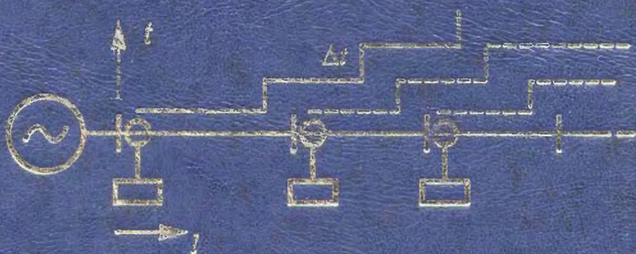
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

Г. Циглер

ЦИФРОВАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ПРИНЦИПЫ И ПРИМЕНЕНИЕ



под редакцией чл.-корр. РАН
А.Ф. Дьякова

Энергоиздат

Герхард Циглер

ЦИФРОВАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ПРИНЦИПЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

Перевод с английского
под редакцией члена-корреспондента РАН,
доктора технических наук, профессора
А.Ф. Дьякова

scanned by EES.SU

Москва
Энергоиздат
2005

УДК 621.316.925.2
ББК 31.27-05
Ц 56

Ziegler Gerhard: Numerical distance protection: principles and application (Siemens). Erlangen: Publicis-MCft-Verl., 2005

Перевод с английского Р.В. Темкиной и Н.С. Ипполитовой
Редактор Б.К. Максимов.

Ц 56 **Циглер Г.** Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. — Перевод с англ. Под ред. Дьякова А.Ф. — М.: Энергоиздат. 2005 — 322 с.

ISBN 5-98073-009-5

Рассмотрены общие принципы работы цифровых дистанционных защит. Автор книги, сотрудник фирмы Siemens, уделяет основное внимание практическому использованию дистанционных защит в распределительных и промышленных сетях. Выбор тем и примеров основан на опыте работы в области релейной защиты энергосистем.

Для студентов, инженеров, аспирантов и специалистов в области цифровой релейной защиты энергосистем, а также распределительных и промышленных электрических сетей.

ISBN 3-89578-142-8 (англ.) © Siemens AG-, Berlin and Munich, 2005
ISBN 5-98073-009-5 (рус.) © Перевод на русский язык, ОАО «Энергопрогресс» 2005.

Предисловие к русскому изданию

Книга, предлагаемая российским специалистам в области релейной защиты энергосистем, посвящена универсальной защите от токов коротких замыканий. В ней рассмотрены современные многофункциональные микропроцессорные устройства, работа которых базируется на цифровых технологиях обработки сигналов и использовании интеллектуальных алгоритмов оценки результатов.

Цифровые технологии позволили получить такие качественно новые характеристики, как уменьшение размеров, стоимости устройств и выявить ряд других преимуществ: повышенную надежность с уменьшенной стоимостью обслуживания за счет непрерывного самоконтроля, бóльшую точность измерения; более широкие диапазоны уставок; компактные и экономичные технические решения; интеграцию цифровых реле в скоординированные системы защиты и управления подстанций через последовательные порты.

Преимущества применения цифровых технологий особенно заметны в случае дистанционной релейной защиты линии из-за свойственной для нее сложности распознавания повреждений и измерения расстояния при изменяющихся структуре энергосистемы и условиях повреждения. Более интеллектуальные алгоритмы и более гибкие рабочие характеристики цифровой дистанционной защиты обеспечивают улучшенную селективность по сравнению с обычными аналоговыми реле.

Цифровые реле дополнительно обеспечивают возможность интеграции необходимых функций защиты линии для случаев защиты от замыканий на землю через высокое сопротивление, защиты от перенапряжений, УРОВ или АПВ и проверки синхронизма в сочетании с экономией средств и рабочих мест.

Особенности дистанционной защиты включают также функции, не связанные непосредственно с защитой, — регистрацию повреждений, контроль нагрузки и диагностику цепи выключателя, причем устройство определения места повреждения, прежде дорогостоящее автономное устройство, для цифровой защиты представляет собой побочный продукт программного обеспечения без дополнительной стоимости.

Настоящая книга предоставляет широкие возможности для детального изучения принципов работы и современного практического использования дистанционных защит. Значительное место в ней уделено применению цифровых дистанционных реле в энергосистемах с анализом их поведения при различных коротких замыканиях и режимах работы энергосистем. Приведены уравнения для практического применения и описаны алгоритмы работы реле. В качестве примеров использованы устройства фирмы Siemens серии 7SA5 и 7SA6 и фрагменты технической документации других фирм-производителей.

Принципиальной отличительной особенностью книги является также то, что в ней большое внимание уделено поведению реле сопротивления при коротких замыканиях на землю, в то время как в российских работах специалисты ограничиваются междуфазными короткими замыканиями. Приятно отметить достаточно подробное рассмотрение устройств релейной защиты (описание, принципы действия, рабочие характеристики).

Книга содержит обстоятельный список использованной зарубежной литературы, в котором, к сожалению, практически отсутствуют ссылки на работы советских и российских специалистов. Этот пробел частично восполнен дополнительным списком литературы основных работ на русском языке.

Первое издание книги вышло в Германии в 1999 г. Русское издание соответствует второму немецкому изданию книги, вышедшему в Германии в середине 2005 г. Второе издание книги существенно переработано и дополнено.

Столь сжатые сроки подготовки и выпуска в свет в русском переводе второго издания книги оказались возможными благодаря большой работе по переводу и оформлению рукописи: сотрудников кафедр релейной защиты и автоматизации энергосистем и техники и электрофизики высоких напряжений: профессора Б.К.Максимова, доцентов И.З. Глускина и Р.В. Темкиной, аспиранта Е.А. Борченко, инженера К.Л. Макеевой, студентов Н.С. Ипполитовой, К.А. Красавиной и Е.В. Кузнецовой.

Книга актуальна и, безусловно, привлечет внимание специалистов, работающих в области проектирования и эксплуатации релейной защиты энергосистем, студентов и аспирантов электроэнергетических специальностей.

Заведующий кафедрой
релейной защиты и
автоматизации энергосистем
МЭИ (ТУ)
Член-корр. РАН
доктор техн. наук, профессор А.Ф. ДЬЯКОВ

Москва, август 2005 г.

Предисловие

Дистанционная защита — это универсальная защита от токов коротких замыканий. Она является основной в системе защиты линий электропередачи и распределительных сетей. Хотя классические дистанционные защиты на электромеханической или статической базе до сих пор широко распространены, наиболее современными считаются многофункциональные микропроцессорные устройства. Они связаны с централизованной системой управления, и ими можно управлять как с персонального компьютера, так и дистанционно. В новых устройствах применяются те же принципы работы, что и в устройствах предыдущего поколения. Цифровая обработка сигнала и интеллектуальные алгоритмы оценки позволили значительно повысить точность и селективность действия устройств. Большая степень функциональной интеграции, наряду со способностью самодиагностики, позволили значительно уменьшить габариты устройств, а также сократить расходы на техническое обслуживание.

В книге описаны общие принципы работы дистанционных защит, особое внимание уделено цифровой технологии. В основу положено практическое применение цифровых дистанционных реле в энергосистемах; проанализировано поведение дистанционной защиты при различных коротких замыканиях (КЗ) и режимах работы системы, выведены уравнения для практического применения и описаны алгоритмы работы.

Так как для каждого производителя характерны свои особенности конструктивного исполнения устройств, которые очень быстро изменяются, они описаны настолько, насколько это необходимо для понимания. В качестве примеров использованы устройства фирмы Siemens серии 7SA5, 7SA6. Однако, существуют некоторые общие особенности, характерные для всех производителей. В книге также даны фрагменты из технической документации, предоставленной фирмами-производителями.

Рассмотрены вопросы современного практического использования дистанционных защит в распределительных и промышленных сетях. Выбор тем и примеров основан на большом опыте работы авторов в области релейной защиты энергосистем. Поэтому многие проблемы и вопросы пользователей прямо или косвенно отражены в этой книге.

Книга ориентирована на студентов и молодых инженеров, а также на опытных пользователей, желающих ознакомиться с цифровой дистанционной защитой. Кроме того, книга может служить пособием по решению проблем применения защит этого вида.

Содержание

Предисловие к русскому изданию 3
Предисловие 5

1. Введение 9

2. Основные определения 11

3. Принципы действия дистанционной защиты 17

3.1. Основные положения 17

3.1.1. Общие представления 17
3.1.2. Сопротивления на зажимах реле (вторичные сопротивления) 18
3.1.3. Диаграмма полного сопротивления 18
3.1.4. Дистанционные измерения 20
3.1.5. Направленные измерения 24
3.1.6. Пуск (определение повреждения) 25
3.1.7. Зоны дистанционной защиты (ступени) 36
3.1.8. Управление зонами, выдержками времени 38
3.1.9. Дистанционная защита с переключением и без переключения входных величин 41
3.1.10. Дистанционная защита с каналами связи 44
3.1.11. Блокировка при качаниях мощности, отключение качаний мощности (защита от выпадений из синхронизма) 56
3.1.12. Дистанционная защита с АПВ 60
3.1.13. Устройство для определения расстояния до места повреждения . . . 67
3.1.14. Ступенчатая диаграмма 71

3.2. Цифровые дистанционные измерения 81

3.2.1. Определение контура замыкания 81
3.2.2. Определение полного сопротивления контура замыкания 86
3.2.3. Цифровое вычисление полного сопротивления 87

3.3. Цифровое определение направления (поляризация) 94

3.3.1 Метод направленных измерений с помощью напряжения петли КЗ (самополяризация) 94
3.3.2 Определение направления с помощью напряжения неповрежденных фаз (кросс-поляризация) 96
3.3.3 Направленная характеристика на плоскости полных сопротивлений . . . 98
3.3.4 Выбор напряжения кросс-поляризации 99
3.3.5 Влияние нагрузки 100
3.3.6 Применение «памяти» напряжений 103
3.3.7 Адаптивное определение направления 104

3.4. Круговые характеристики цифровых устройств 105

3.4.1. Основная форма круговой характеристики срабатывания (МНО-окружность) 105
3.4.2. Поляризованная круговая характеристика 107
3.4.3. Влияние нагрузки на работу РС с поляризованными МНО-окружностями 110
3.4.4. Круговые характеристики с «памятью» напряжений 111

3.5. Дистанционные измерения, влияющие факторы ... 113
3.5.1. Сопротивление в месте замыкания (переходное сопротивление) .. 113
3.5.2. Промежуточная подпитка ... 131
3.5.3. Параллельные линии ... 135
3.5.4. Дистанционная защита трансформатора ... 145
3.5.5. Несимметрия линии ... 154
3.5.6. Последовательная (продольная) компенсация ... 163

4. Технические особенности устройств ... 170
4.1. Интеллектуальные электронные устройства (IED) ... 170
4.2. Техническое исполнение (конструкция) ... 172
4.3. Соединения терминалов ... 173
4.4. Интегрированные функции ... 174
4.5. Подключение микропроцессорных устройств ... 180
4.6. Обслуживание устройства ... 183

5. Применение

5.1. Общие положения ... 186
5.1.1. Критерии применения ... 186
5.1.2. Минимальная длина линии ... 186
5.1.3. Время отключения ... 188
5.1.4. Защита с использованием канала связи. Выбор способа управления . 190
5.1.5. Требования к измерительным трансформаторам ... 193
5.1.5.1. Трансформаторы тока ... 193
5.1.5.2. Трансформаторы напряжения ... 207

5.2. Дистанционная защита в распределительных сетях ... 215
5.2.1. Общие положения ... 215
5.2.2. Дистанционная защита в сетях с компенсированной или изолированной нейтралью ... 222
5.2.3. Дистанционная защита в распределительных сетях с низким сопротивлением заземления нейтральной точки ... 229
5.2.4. Дистанционная защита в заводских электросетях ... 232

5.3. Дистанционная защита в магистральных сетях ... 234
5.3.1. Общие положения ... 234
5.3.2. Концепция защиты ... 238
5.3.2.1. Высоковольтные воздушные линии электропередачи ... 238
5.3.2.2. Линии сверхвысокого напряжения ... 241
5.3.2.3. Подстанции с полуторной схемой включения ... 244
5.3.2.4. Кольцевая система шин ... 246
5.3.2.5. Двухцепные линии ... 246
5.3.2.6. Трехконцевые линии ... 246
5.3.2.7. Линии с последовательной (продольной) компенсацией ... 248

6. Уставки защиты ... 250

6.1. Общие положения ... 250

6.2. Обнаружение коротких замыканий (третья ступень) 251

6.2.1. Способы пуска защиты и подход к выбору уставок ПО. 251
6.2.2. Надёжность обнаружения коротких замыканий 252
6.2.3. «Нагрузочная способность» защиты 253
6.2.4. Фазная селективность. 255
6.2.5. Уставки органа определения КЗ по U-I-φ-критерию. 255
6.2.6. Уставки органа определения КЗ по полному сопротивлению. 257

6.3. Уставки ступеней дистанционной защиты 262

6.3.1. Зона защиты (X-уставка) и ступени выдержки времени. 262
6.3.2. Компенсация влияния сопротивления дуги (R-уставка) 265
6.3.3. Особенности выбора уставок защиты в кабельных сетях 269
6.3.4. Регулировка зоны защиты в случае больших значений R/X-уставок 270
6.3.5. Ступени защиты с круговыми и многоугольными характеристиками срабатывания 272
6.3.6. Уставки блокировки при качаниях 273

7. Примеры расчётов. 278

7.1. Двухцепные линии в системах с заземленной нейтралью. 278
7.2. Трехконцевые линии 289

8. Ввод в действие 298

8.1. Тестирование системы защиты 298
8.2. Тестирование под нагрузкой 299

9. Техническое обслуживание 302

9.1. Самодиагностика 302
9.2. Подход к техническому обслуживанию 302

10. Приложение. 304

П.1. Алгоритмы дистанционных измерений. 304

П.1.1. Основные принципы. 304
П.1.2. Алгоритм, основанный на использовании фильтров Фурье 305
П.1.3. Переходный режим 308
П.1.4. Практическое применение 309
П.1.5. Литература 310

П.2. Расчет области действия резервных ступеней защиты. 311

П.3. Расчет области действия резервных ступеней защиты на параллельных линиях 314

11. Список литературы 317

11.1. Научно-технические статьи. 317
11.2. Книги. 321
11.3. Дополнительная литература. 321

1. Введение

Дистанционная защита — это универсальная защита от коротких замыканий. Её принцип действия основан на измерении и оценке полного сопротивления при коротком замыкании, которое, в общем случае, пропорционально расстоянию от места установки защиты до точки КЗ.

Область применения

Дистанционная защита является основной защитой в магистральных и объединённых распределительных сетях.

Таким образом, она является основной защитой воздушных и кабельных линий, а также резервной защитой таких смежных участков сети, как шины, трансформаторы и отходящие линии.

Дистанционная защита является более быстродействующей и более селективной, чем токовая защита. Она менее чувствительна к изменению сопротивлений и режима работы системы.

Преимуществом цифровой дистанционной защиты является встроенная функция определения места повреждения. Поэтому она также нашла применение в радиальных сетях.

Её время срабатывания приблизительно равно 1—2 периодам (20—40 мс на частоте 50 Гц) при повреждениях в пределах первой зоны (первые 80—90 % длины линии). Во второй зоне (оставшиеся 10—20 % длины защищаемой линии) время срабатывания приблизительно равно 300—400 мс. Последующие зоны соответствуют резервной защите и имеют большие времена срабатывания.

При наличии каналов связи между концами линии (контрольные провода, высокочастотная связь по ЛЭП, радиосвязь или оптоволокно) дистанционная защита может иметь абсолютную селективность. Тогда она обеспечивает быстрое отключение КЗ по всей длине линии, аналогично дифференциальной схеме защиты, а также дальнее резервирование при КЗ на смежных участках.

Для дистанционной защиты требуется узкий канал связи, т. к. необходимо передавать лишь сигналы срабатывания или несрабатывания, а не измеренные значения. Схемы дистанционной защиты с каналами связи используются в различных вариантах, обычно в сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

В заключение необходимо добавить, что дистанционная защита также применяется *в качестве резервной для мощных* блоков генератор-трансформатор, где необходимы высокая чувствительность и малое время отключения.

Технические преимущества

С тех пор как дистанционная защита была введена в 1920 году, она претерпела множество изменений: от индукционных и электромагнитных систем к статическим реле на базе операционных усилителей. В результате, точность и селективность были значительно повышены. Время срабатывания также уменьшилось на порядок: первоначально оно составляло сотни миллисекунд, а сейчас равно нескольким десяткам миллисекунд. Значительный прорыв в развитии дистанционных защит произошёл в 1985 году, когда была использована микропроцессорная технология: [1.1—1.4].

Цифровые устройства являются интеллектуальными системами. Они могут *хранить информацию и обмениваться ею с* периферийными устройствами. Эти возможности позволяют существенно улучшить качество защиты.

В тоже самое время, дальнейшее развитие дистанционной защиты связано с более высокими требованиями к системам защиты из-за всё большего усложнения схем магистральных и распределительных сетей, а также возросшего энергопотребления установок.

Цифровая дистанционная защита [1.5—1.8]
Обработка дискретного сигнала и цифровой способ измерений в сочетании с точными адаптивными фильтрами позволяют повысить точность и сократить время срабатывания. Более того, интеллектуальные программы оценки позволяют улучшить селективность даже в случаях сложных видов повреждений. К тому же соотношение «стоимость/технические характеристики» значительно улучшилось, благодаря тому, что:

— современные устройства многофункциональны и могут сочетать в себе как функции защиты, так и некоторые дополнительные функции, например, эксплуатационные измерения и регистрация нарушений нормального режима работы энергосистемы;

— на каждом конце линии устанавливается одно устройство для основной и одно для резервной защиты (в случая её применения);

— с помощью комплексной системы самоконтроля осуществлён переход от дорогих профилактических проверок к более эффективному техническому обслуживанию в зависимости от создавшихся условий;

— цифровые приборы позволяют осуществлять управление с персонального компьютера, а также использовать их в системах управления через последовательные интерфейсы.

2. Основные определения

Определения, используемые в книге, соответствуют приведенным в «Международном электротехническом словаре — глава 448: Защита энергетических систем» [2.1] (IEC60050—448).

Дистанционная защита

Защита, принцип действия и селективность которой основаны на измерении в месте установки защиты электрических величин, характеризующих повреждение, и сравнении их с уставками зон [448-14—01].

Статические реле (защита)

Реле, выполненные на основе аналого-электронной элементной базы с использованием транзисторов, операционных усилителей и логических микросхем.

Цифровая дистанционная защита

Дистанционная защита, основанная на микропроцессорной технологии, с аналого-цифровым преобразованием измеренных величин (тока и напряжения), цифровым определением расстояния и цифровой логикой.

Зоны дистанционной защиты

Зона досягаемости (предел измерений) измерительных элементов дистанционной защиты в электроэнергетических системах [448-14—02].

Неполный/полный охват защищаемой зоны (сокращённая/увеличенная зоны)

Режим работы дистанционной защиты, когда уставки наиболее быстродействующей ступени дистанционной защиты меньше (неполный охват защищаемой зоны) или больше (полный охват защищаемой зоны), чем длина защищаемого участка [448-14-15/07].

Граница зоны

Измеренное полное сопротивление, соответствующее концу защищаемой зоны.

Расширение зоны (излишний охват) в переходном режиме

Срабатывание дистанционной защиты при увеличенных, по сравнению с установленным, значениях сопротивления [15]. Эта тенденция проявляется в переходных режимах, возникающих при изменении тока в результате КЗ. Для минимизации этого эффекта в токовых цепях традиционных реле использовались шунты, моделирующие сопротивление линии. В цифровых реле для предотвращения расширения зоны применяются цифровая фильтрация, подавляющая постоянную (апериодическую) составляющую тока КЗ, и адаптивный контроль зоны действия защиты.

Характеристика полного сопротивления (реле)

Направленная круговая характеристика в плоскости R-X с центром в начале координат. При выполнении направленной ступени защиты необходимо дополнительно к данной использовать характеристику направленности (например, в виде прямых линий), ограничивающую зону срабатывания.

Возможно смещение характеристики на плоскости R-X.

Реле полного сопротивления

Первоначально термин относился к реле сопротивления (РС) с характеристикой полного сопротивления. Однако, в силу того, что полное сопротивление включает как активную, так и реактивную состав-

ляющие, данный термин в настоящее время рассматривается как эквивалентный термину «дистанционное реле».

МНО-характеристика (реле)

Круговая характеристика направленного РС, проходящая через начало координат в плоскости R-X. Иногда реле с такой характеристикой называют реле проводимости, т. к. в плоскости проводимости МНО-окружности соответствует прямая линия.

Поляризация

Обеспечивает чувствительность реле при определении направления в случае близких к месту установки защиты КЗ.

Кросс-поляризация

Обеспечение направленности действия реле при близких КЗ с помощью определенной доли напряжения неповрежденных фаз. Часто используется так называемая 90°-схема, когда в качестве поляризующего используется напряжение, сдвинутое по отношению к напряжению повреждения, подводимого к реле, на 90°.

Поляризованная МНО-характеристика

В традиционных реле с направленной круговой характеристикой, проходящей через начало координат, в качестве поляризующего используется напряжение петли КЗ (напряжение поврежденных фаз). Это так называемые самополяризуемые реле проводимости.

При использовании кросс-поляризации к поляризующему напряжению добавляется определенная часть напряжения неповрежденных фаз, благодаря чему обеспечивается «неограниченная» чувствительность при определении направления в случае близких КЗ с напряжением петли, близким к нулю. В этом случае при КЗ в прямом направлении окружность расширяется в направлении отрицательных значений X, охватывая начало координат, а при КЗ в обратном направлении — смещается в сторону положительных значений X, исключая точку в начале координат. Смещение характеристики зависит от сопротивления источника питания (см. п.п. 3.4.2).

Характеристика реле реактивного сопротивления

Характеристика в виде прямой линии, параллельной оси R с постоянным значением сопротивления срабатывания по оси X. Т. к. зона действия реле по R не имеет ограничения, то его следует применять совместно с пусковой ступенью защиты, имеющей определенную (круговую или четырехугольную) зону срабатывания.

Четырехугольная характеристика срабатывания РС

Характеристика, ограниченная прямыми линиями. Боковые стороны характеристики часто выполняются параллельными линиями с углом наклона по отношению к оси R, равным углу сопротивления линии.

Зона блокирования нагрузки

Для уменьшения влияния нагрузки на работу РС предусматривается выделение на его характеристике срабатывания специальной области клиновидной формы со сниженными значениями сопротивлений срабатывания (см. п.п. 6.2.2 и 6.3.1).

Система измерений (измерительные органы)

Узел или устройство для измерения расстояния до точки КЗ и направления, включая пусковые органы. Входными величинами являются ток и напряжение короткого

замыкания. Активный сигнал появляется на выходе, когда точка КЗ лежит в пределах соответствующей зоны, т. е. когда измерительная система срабатывает. В обычных реле используется электромеханическая или статическая система измерений. В цифровых реле система измерений представляет собой модуль программного обеспечения для расчёта полного сопротивления контура, а также для сравнения с уставками.

Полная схема дистанционной защиты (без переключения входных величин)

Обычно дистанционная защита имеет отдельные измерительные органы для каждого вида междуфазных КЗ, замыканий на землю и для каждой защищаемой зоны [448-14—03].

Это означает, что в цифровых защитах полные сопротивления контуров всех междуфазных замыканий и всех замыканий на землю одновременно вычисляются и сравниваются с соответствующими уставками. [7SA6 или 7SA522].

Дистанционная защита с переключением входных величин

Дистанционная защита, обычно имеющая только один измерительный орган для всех видов замыканий в системе и/или для всех зон защиты.

Для цифровых защит термин «переключаемая» не применим, так как входные величины постоянно измеряются и записываются в буфер. В измерительных органах не происходит никаких коммутаций. Реле, в которых используется пусковой орган, выявляющий петлю КЗ (повреждения), для которой (только этой петли) осуществляется измерение, могут быть названы односистемными дистанционными реле (7SA511).

Дистанционная защита с переключением входных величин (реле со сложной системой измерений)

Дистанционная защита с несколькими измерительными системами и упрощённым выбором петли КЗ. (Этот вариант применялся в Германии при выполнении электромеханической защиты в сети СВН: например, защита R3Z27 с 3 измерительными системами).

Дистанционная защита с каналом передачи телесигналов (с телеуправлением)

Дистанционная защита для которой необходима телекоммуникационная связь между концами защищаемой зоны. (В соответствии с 44-15—01).

Дистанционная защита с разрешающими сигналами

Дистанционная защита, в которой используется сигнал, разрешающий срабатывание защиты [448-14—09].

Дистанционная защита с блокирующими сигналами

Дистанционная защита, в которой используется сигнал, блокирующий срабатывание защиты [448-14—10].

Время пуска (собственное время срабатывания измерительных органов)

Время, проходящее с момента возникновения короткого замыкания до момента срабатывания системы измерений. Когда это время истекает, дальнейшее функционирование либо разрешается, либо блокируется, а также включается сигнализация. Команда на отключение подается только после появления соответствующего сигнала от элементов логики отключения или после истечения установленной выдержки времени.

Коэффициент возврата

Это отношение порога возврата измерительных органов к порогу срабатывания. Различие порогов необходимо для предотвращения пульсаций, т. е. срабатывания и возврата системы («дребезга» контактов) измерительной системы. Коэффициент возврата меньше 1 для систем измерения, которые срабатывают при увеличении входных величин (0,95 для максимальных токовых защит) и больше 1 для систем измерений, которые срабатывают при уменьшении входных величин (1,05 для реле сопротивления).

Время возврата

Время, в течение которого на выходе реле сохраняется сигнал срабатывания после того, как входной сигнал снизился до значения порога возврата реле.[1]

Время возврата пускового органа после исчезновения тока КЗ имеет большое значение для дистанционных защит. Это время необходимо учитывать при расчёте выдержек времени (3.1.14).

Время отключения

Термин «Время отключения» для дистанционной защиты — это время, проходящее с момента возникновения короткого замыкания до момента замыкания контактов цепи отключения. Время отключения быстродействующих ступеней защиты (не имеющих замедления) или типовое (среднее) время срабатывания указывается в технической документации.

Однако, время отключения не является постоянной величиной. На него в значительной степени влияют несколько факторов, таких, например, как напряжение и ток короткого замыкания, а также местоположение короткого замыкания. Эта зависимость обычно представляется в виде графика («профильные» кривые).

При определении времени отключения защиты, необходимо учесть возможные задержки при передаче сигнала и время срабатывания выходных реле.

Ступенчатые выдержки времени

Уставки выдержек времени для зон резервной защиты.

Выдержка времени для конца зоны

В Германии пусковой орган дистанционной защиты используется для дальнего резервирования. Пусковой элемент подаёт сигнал на отключение с большой выдержкой времени. Для этой цели используются выдержки времени направленной и ненаправленной ступени.

Автоматическое повторное включение (АПВ)

На воздушных линиях большинство коротких замыканий являются неустойчивыми и исчезают после отключения источника питания. После исчезновения КЗ линия опять может быть введена в работу. Обычно это производится при помощи АПВ после короткой выдержки времени (бестоковой паузы). В ряде случаев при неуспешном первом включении используется следующее включение (многократное АПВ).

Контур (петля) короткого замыкания

Это контур, по которому ток проходит от источника питания до места КЗ и обратно.

Для дистанционной защиты — это контур, по которому ток КЗ проходит от места установки защиты до места КЗ и обратно.

[1] Реле дистанционной защиты возвращаются при увеличении сопротивления до значения, соответствующего $Z_R = 1,05 Z_A$, где Z_R — сопротивление возврата (Z_B), Z_A — сопротивление срабатывания.

Напряжение короткого замыкания (напряжение повреждённого контура)

Этот термин относится к напряжению контура замыкания. В случае дистанционной защиты это соответствует напряжению между повреждёнными фазами (при междуфазном КЗ) или между повреждённой фазой и землёй (при КЗ на землю) в месте установки реле.

Это напряжение необходимо для работы дистанционной защиты. Если это напряжение используется для определения направления, то его называют напряжением повреждённого контура.

Напряжение неповреждённой петли (напряжение здоровой фазы)

Для того, чтобы определить направление КЗ (положение точки короткого замыкания относительно реле), современные дистанционные защиты используют напряжения, измеренные на неповреждённых фазах, например, напряжение U_{B-C} для короткого замыкания L1-E ($K_A^{(1)}$).

Благодаря этому достигается практически неограниченная чувствительность при определении направления даже при КЗ вблизи места установки релейной защиты, когда напряжение повреждённого контура слишком мало для достоверных измерений (3.3.1).

Полное сопротивление цепи короткого замыкания

Это сопротивление цепи короткого замыкания между повреждёнными фазами или между повреждённой фазой и землёй.

Для дистанционной защиты термин полное сопротивление цепи короткого замыкания относится к сопротивлению между точкой, где измеряется напряжение, и точкой короткого замыкания.

Если этот термин используется в связи с расчётами тока КЗ, то он означает сопротивление всего контура короткого замыкания от источника питания до точки КЗ.

«Кажущееся» сопротивление

Сопротивление, измеряемое реле при КЗ, определяется током и напряжением, подводимыми к устройству. Оно может отличаться от *действительного значения* из-за неравенства, по разным причинам, токов в месте установки защиты и в месте повреждения.

На сопротивления, измеряемые в неповрежденных фазах, существенное влияние оказывает нагрузка, что может привести к излишним срабатыванием защиты. Для предотвращения этого применяются такие меры, как, например, ограничение зоны действия или использование специальных избирателей (см. п.п. 3.1.6).

При перегрузках и качаниях в системе также возможны излишние и ложные срабатывания дистанционной защиты из-за *того, что сопротивление, измеряемое* реле, приближается или входит в зону срабатывания. Для предотвращения срабатывания предусматривается ограничение уставок в R-направлении и использование устройств, блокирующих защиту при качаниях (см. п.п. 3.1.11).

Полное сопротивление источника питания (системы)

Это часть сопротивления контура замыкания, которая находится между источником питания и точкой, где измеряется напряжение.

Отношение сопротивлений

Для конкретной точки измерений это отношение сопротивления источника (системы) к сопротивлению цепи КЗ (сопротивление защищаемой зоны) [448-14—14].

Оно относится как к источнику, так и к системе (SIR) и оказывает влияние на значение напряжения повреждённой фазы, которое воспринимает реле.

Полное сопротивление нагрузки

Для любой точки измерений это отношение фазного напряжения к фазному току, равному току нагрузки [448-14—15].

Переходное сопротивление в месте повреждения

Это сопротивление между фазными проводниками или фазным проводником и землёй в точке замыкания.

Вектор

Используется следующее обозначение вектора для электрических сигналов:

$$\underline{A} = A \cdot e^{j\varphi} = A \cdot (\cos\varphi + j\sin\varphi) = B + jC,$$

$$A = \sqrt{B^2 + C^2},$$

где A — среднеквадратичное значение тока, напряжения или мощности, а φ — это фазный угол в момент времени $t = 0$.

Это представление также используется для полного сопротивления, которое в действительности не зависит от времени.

3. Принципы действия дистанционной защиты

В этом разделе рассматриваются общие принципы дистанционной защиты. На них базируется материал последующих глав.

3.1. Основные положения

3.1.1. Общие представления

Дистанционная защита (*D*) определяет полное сопротивление цепи короткого замыкания по измеренному напряжению и току КЗ в месте установки реле (рис. 3.1).

Измеренное полное сопротивление цепи КЗ сравнивается с известным значением сопротивления линии. Если измеренное полное сопротивление цепи КЗ меньше, чем уставка, то это рассматривается как внутреннее короткое замыкание и подается команда на отключение выключателя.

Это значит, что дистанционная защита в самом простом варианте может принять решение по напряжению и току, измеренным в месте установки реле. Этой базовой защите для принятия решения не требуется никакой другой информации, и поэтому защита не зависит от какого-либо другого оборудования или сигналов каналов связи.

Однако, из-за погрешности измерения расстояния до места короткого замыкания, являющейся следствием погрешностей измерения тока и напряжения, погрешности трансформации и неточного определения полного сопротивления линии, которое обычно определяется косвенно, на практике не возможна 100 % защита линии. Для обеспечения гарантированной селективности при внешних и внутренних коротких замыканиях устанавливают некоторый запас надёжности (10—15 % длины линии относительно удалённого конца), используя ступень с неполным охватом защищаемой зоны (1-ая зона) (рис. 3.2).

Оставшаяся часть линии защищается 2-ой ступенью, с запасом охватывающей конец линии. Она должна иметь выдержку времени по отношению к времени срабатывания защиты на смежной линии. В случае электромеханической защиты ступень выдержки времени составляет 400—500 мс, в случае аналоговых статических защит и цифровых защит 250—300 мс. Составляющие ступени выдержки времени: время отключения выключателя, расположенного после защиты (на смежном уча-

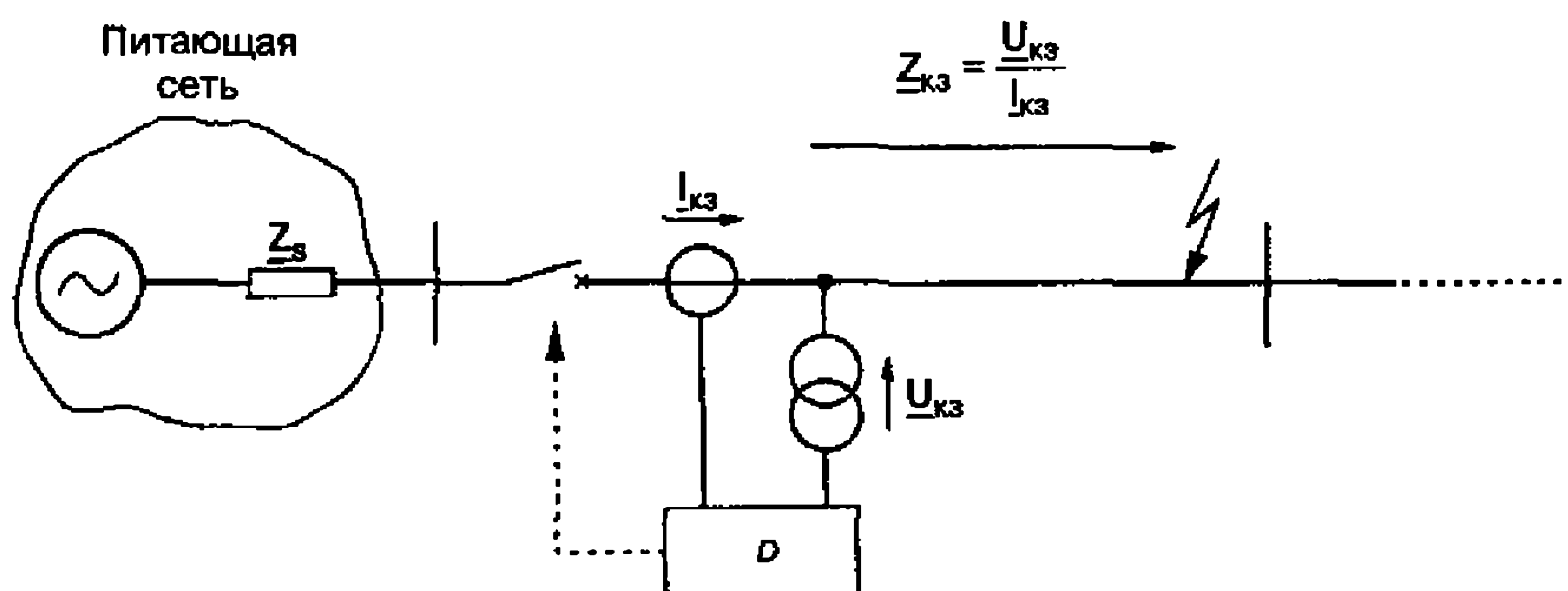


Рис. 3.1. Принцип дистанционной защиты. Измерение сопротивления короткого замыкания.

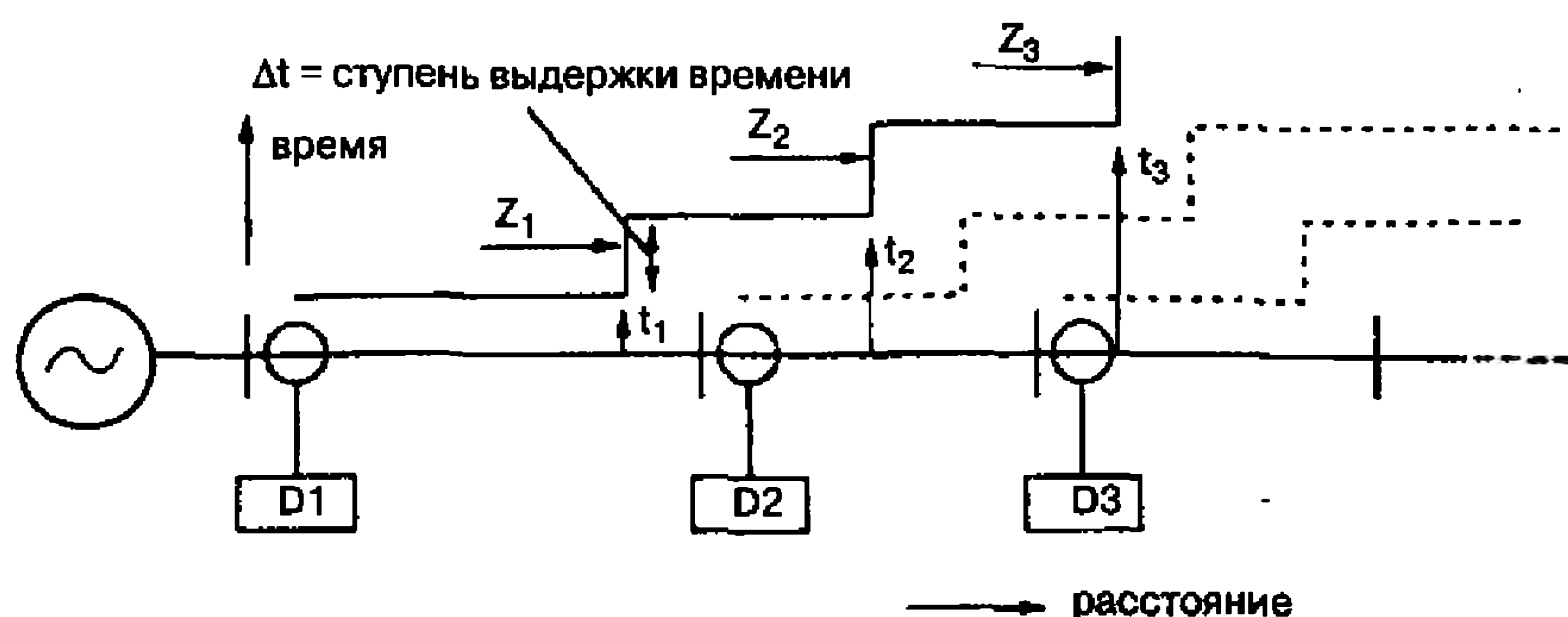


Рис. 3.2. Дистанционная защита, ступени защиты

стке), временная задержка элементов измерения и время запаса рассмотрены в п.п. 3.1.14.

По сравнению с дифференциальной защитой, которая обладает абсолютной *селективностью* (ее защищаемая зона определяется местом установки трансформаторов тока по концам линии), дистанционная защита (в простейшем варианте, без каналов связи) не обладает абсолютной селективностью. Селективность отключения обеспечивают ступенчатым выбором выдержек времени (согласованием с защитами смежных участков).

Дистанционную защиту можно использовать и как резервную для защиты смежных участков линии. Для этой цели используется вторая ступень. Она охватывает шины противоположной подстанции и частично смежные линии. Третья ступень обычно используется для защиты всей длины смежных линий, если это возможно (рис. 3.2). Согласование зон защиты и выдержек времени достигается при использовании диаграммы ступеней (п.п. 3.1.14).

3.1.2. Сопротивления на зажимах реле (вторичные сопротивления)

Реле дистанционной защиты выполняются в виде так называемых вторичных реле, то есть к ним подводятся ток и напряжения от измерительных трансформаторов тока (CT) и напряжения (VT). Таким образом, реле измеряет вторичное сопротивление, которое зависит от коэффициентов трансформации трансформаторов тока и напряжения:

$$Z_в = \frac{K_I}{K_U} \cdot Z_п = \frac{I_п/I_в}{U_п/U_в} \cdot Z_п. \qquad (3.1)$$

Пример:

Номинальное напряжение системы: $U_п =$ = 110 кВ

Коэффициент трансформации трансформатора тока: K_I = 600 А/1А.

Коэффициент трансформации трансформатора напряжения: K_U = 100 кВ/0,1 кВ

$$Z_в = \frac{600/1}{110/0,1} \cdot Z_п = 0,545 Z_п.$$

Диаграммы ступеней обычно строят по первичным сопротивлениям.

Уставки реле формируют по вторичным сопротивлениям, поскольку проверку реле производят по вторичным сигналам. Поэтому сопротивление реле необходимо пересчитывать при помощи соотношения (3.1).

3.1.3. Диаграмма полного сопротивления

Проектировщику релейной защиты диаграмма сопротивлений необходима для

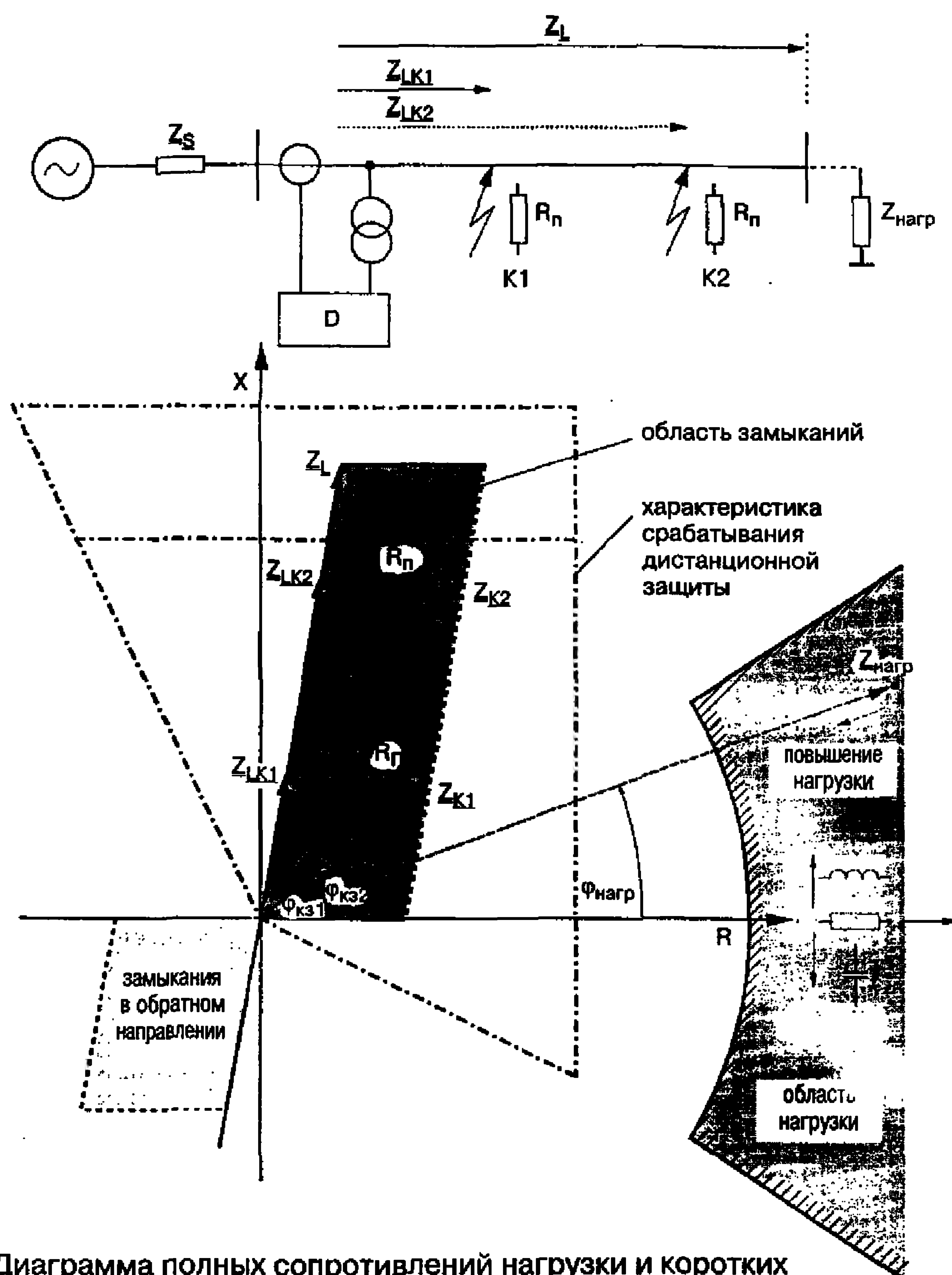


Рис. 3.3. Диаграмма полных сопротивлений нагрузки и коротких замыканий

оценки поведения защиты. На этой диаграмме характеристики реле, измеренную нагрузку и сопротивление КЗ представляют на комплексной плоскости сопротивлений *R-X* (рис. 3.3). Их соотношение полностью определяет функционирование реле в системе.

В нормальном режиме работы системы измеренное сопротивление соответствует сопротивлению нагрузки. Его величина обратно пропорциональна нагрузке ($Z_{нагр} = U^2/S_{нагр}$). Угол между током и напряжением соответствует углу нагрузки (рис. 3.3), и определяется соотношением активной и реактивной мощности $\varphi_{нагр} = \operatorname{arctg}(Q/P)$.

После возникновения короткого замыкания измеряемое сопротивление скач-

ком изменяется до значения сопротивления цепи КЗ, которое обычно меньше, чем сопротивление нагрузки. Его величина соответствует сопротивлению линии $\underline{Z}_{LK}$ между местом установки реле и местом короткого замыкания (близкое замыкание $\underline{Z}_{LK1}$ или удалённое замыкание $\underline{Z}_{LK2}$). При наличии в месте КЗ сопротивления дуги или переходного активного сопротивления, к сопротивлению линии добавляется дополнительное сопротивление $R_п$. Угол между током и напряжением КЗ — это угол короткого замыкания $\varphi_{кз}$.

Характеристики срабатывания дистанционной защиты определяются фиксированной областью на диаграмме сопротивлений[2].

Область замыкания отделена от области нагрузки и определены зоны досягаемости (границы зоны) ступеней. Диаграмма позволяет определить, соответствует ли установленная граница в направлении *R* ожидаемому переходному сопротивлению цепи КЗ. Направленные характеристики определяют две области замыканий, с помощью которых устанавливается направление короткого замыкания (прямое или обратное).

Характеристики реле сопротивления представляют собой геометрические фигуры, составленные из прямых линий, окружностей и секторов окружностей. Эти ограничения накладываются аналоговыми системами измерений.

Применение цифровых защит позволило расширить выбор характеристик срабатывания и оптимизировать их. Типичный пример приведен на рис. 3.3.

[2] При использовании напряжения здоровых фаз, область пусковой характеристики изменяется в соответствии с сопротивлением источника. Это тщательно разобрано в п.п. 3.3.1.

3.1.4. Дистанционные измерения

Традиционные реле сравнивают сопротивление цепи КЗ с сопротивлением модели линии для того, чтобы определить, находится ли замыкание в пределах защищаемой зоны.

В электромеханических реле, производимых в Германии, используется схема (рис. 3.4, *а*) сравнения выпрямленных значений, пропорциональных току $I_{КЗ}$ и напряжению $U_{КЗ}$ (схема сравнения абсолютных значений). Такие реле имеют в комплексной плоскости характеристику в виде окружности с центром в начале координат (рис. 3.4, *б*). При соответствующей модификации измерительной цепи окружность может быть перемещена на диаграмме сопротивлений (рис. 3.5).

Таким образом, достигается улучшение работы защиты при замыканиях через переходное сопротивление (сопротивление дуги) [3.1].

Английские/американские производители используют измерительную технику, основанную на ферромагнитном принципе с индукционными реле (рис. 3.6, *а*).

При использовании различных цепей измерений на диаграмме сопротивлений могут быть получены различные характеристики. Наиболее известная характеристика — МНО-характеристика (направленная круговая характеристика, проходящая через начало координат) (рис. 3.6, *б*) [3.2].

Такие характеристики использовались в электромеханических и статических реле сопротивления (РС). Однако, и в современных цифровых устройствах США им отдается предпочтение. Исключение составляют дистанционные защиты от замыканий на землю на коротких линиях, где применяются РС с четырехугольными характеристиками, обеспечивающими расширенную зону срабатывания в направле-

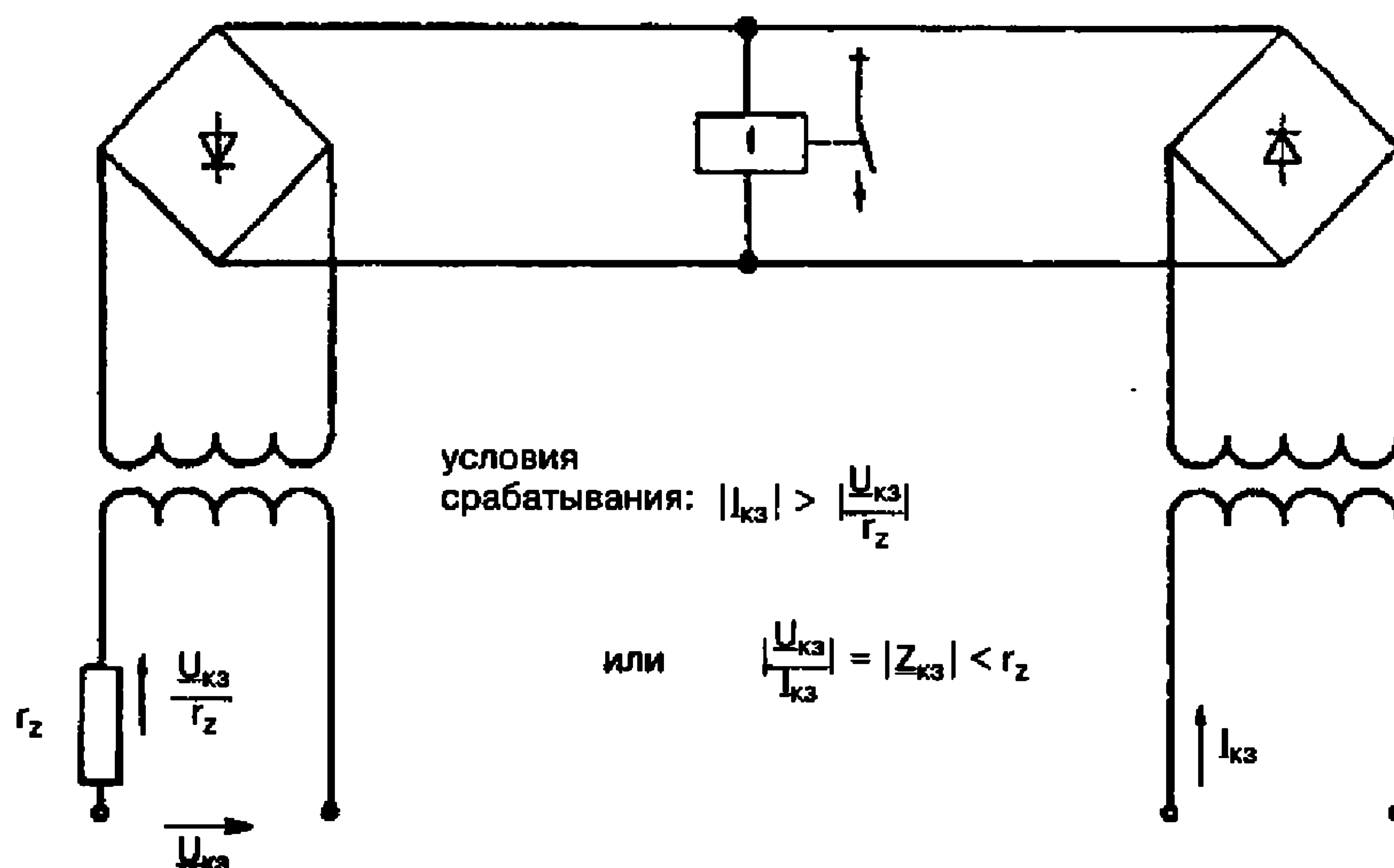


Рис. 3.4, а. Мостовая схема сравнения на выпрямителях (схема сравнения абсолютных значений)

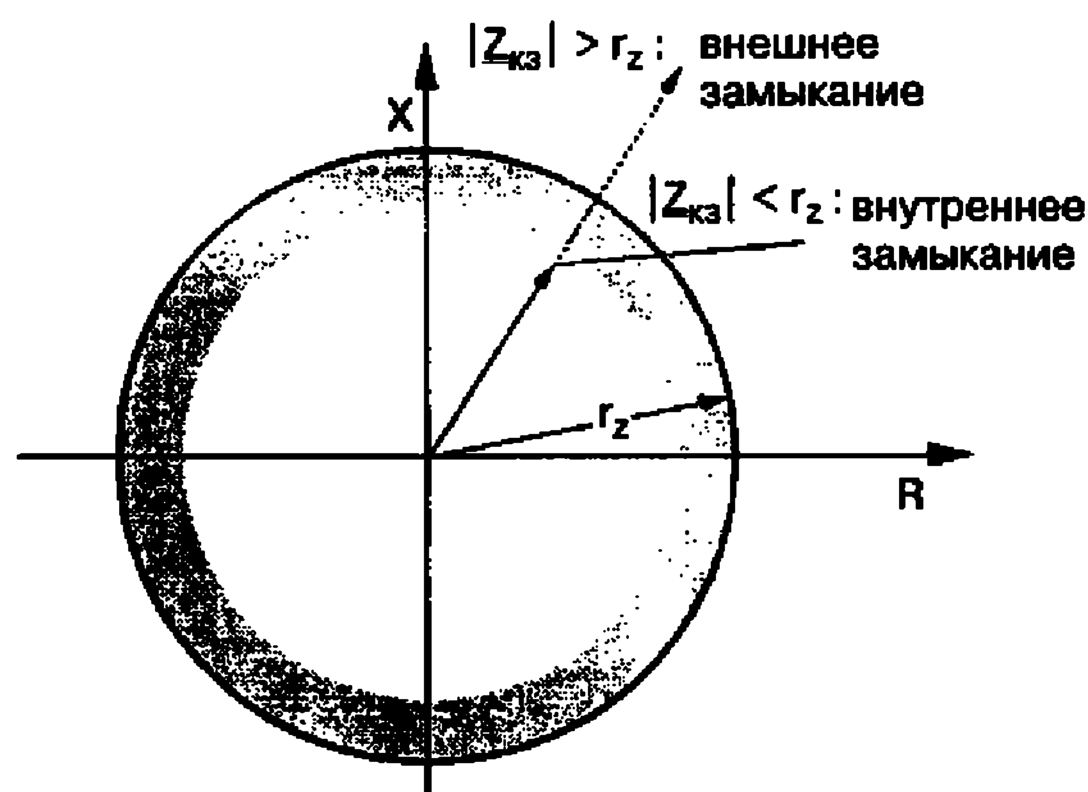


Рис. 3.4, б. Окружность на диаграмме сопротивлений

нии *R* для охвата переходных сопротивлений (см. далее).

Сопротивление срабатывания реле определяется соотношением:

$$Z = Z_R \cdot \cos(\theta - \varphi), \qquad (3.2)$$

где Z_R — уставка РС, $\theta = \varphi_{м.ч}$ — угол максимальной чувствительности, адаптируемый к углу сопротивления линии. Таким образом, Z_R соответствует сопротивлению линии. Это было важно для быстродействующих электромеханических и статических РС, в токовых цепях которых использовался трансреактор для снижения влияния на работу РС апериодической составляющей тока КЗ.

На коротких линиях обычно $\varphi_{м.ч}$ меньше угла сопротивления линии для улучшения возможности компенсации сопротивления дуги. В Германии для защиты распределительных сетей, в частности, для кабельных линий с $\varphi < 30°$ использовались электромеханические реле с $\varphi_{м.ч} = 0°$, т. е. с полностью смещенной в сторону поло-

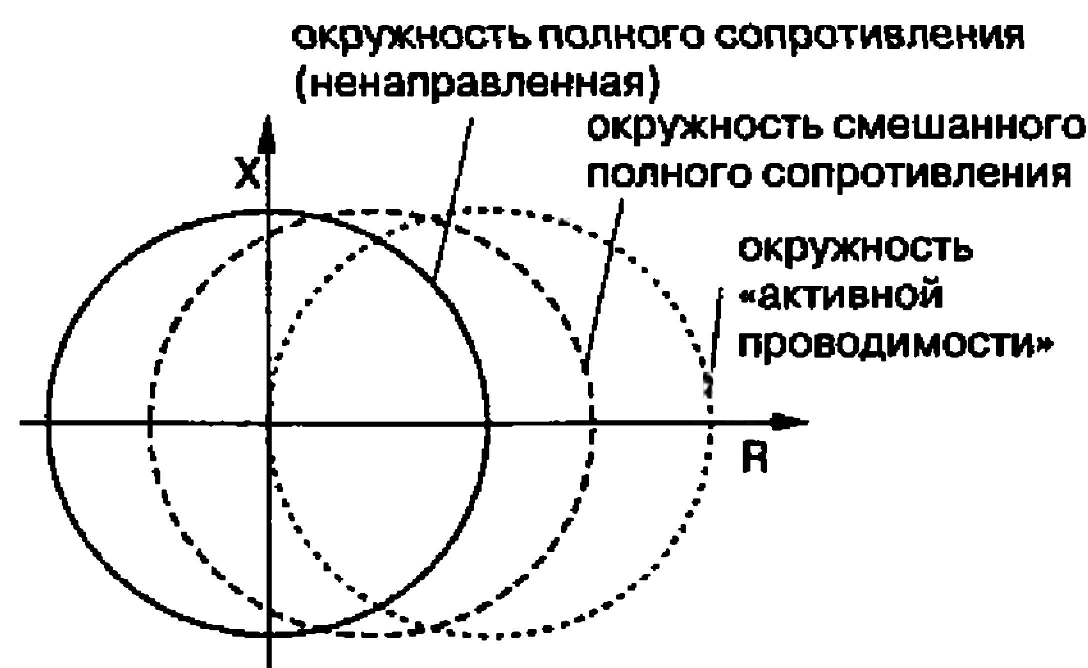
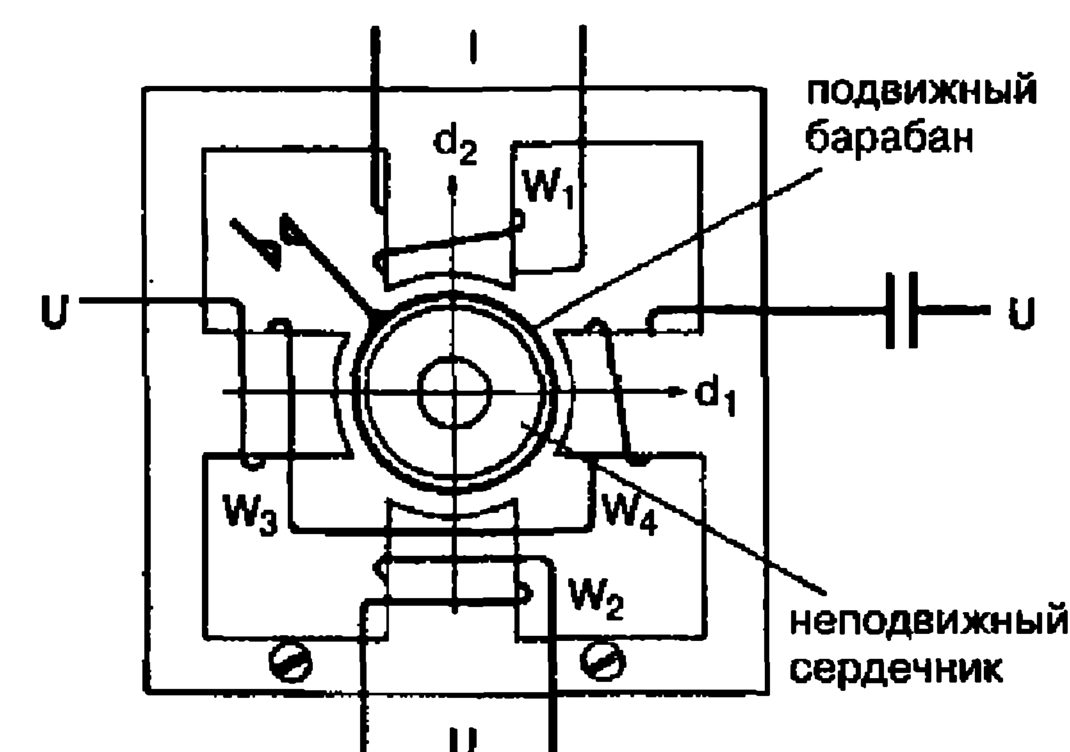


Рис. 3.5. Характеристики срабатывании электромеханических защит (германские производители)



$$U_{кз}\cdot I_{кз}\cdot\cos(\varphi-\theta) \leq \frac{1}{Z_R}\,U_{кз}^2$$

$$\frac{U_{кз}}{I_{кз}} = Z_{кз} < Z_R\cdot\cos(\varphi-\theta)$$

W1: управляющая обмотка
W2: тормозная обмотка
W3 + W4: поляризующая обмотка

Рис. 3.6, а. Индукционное реле

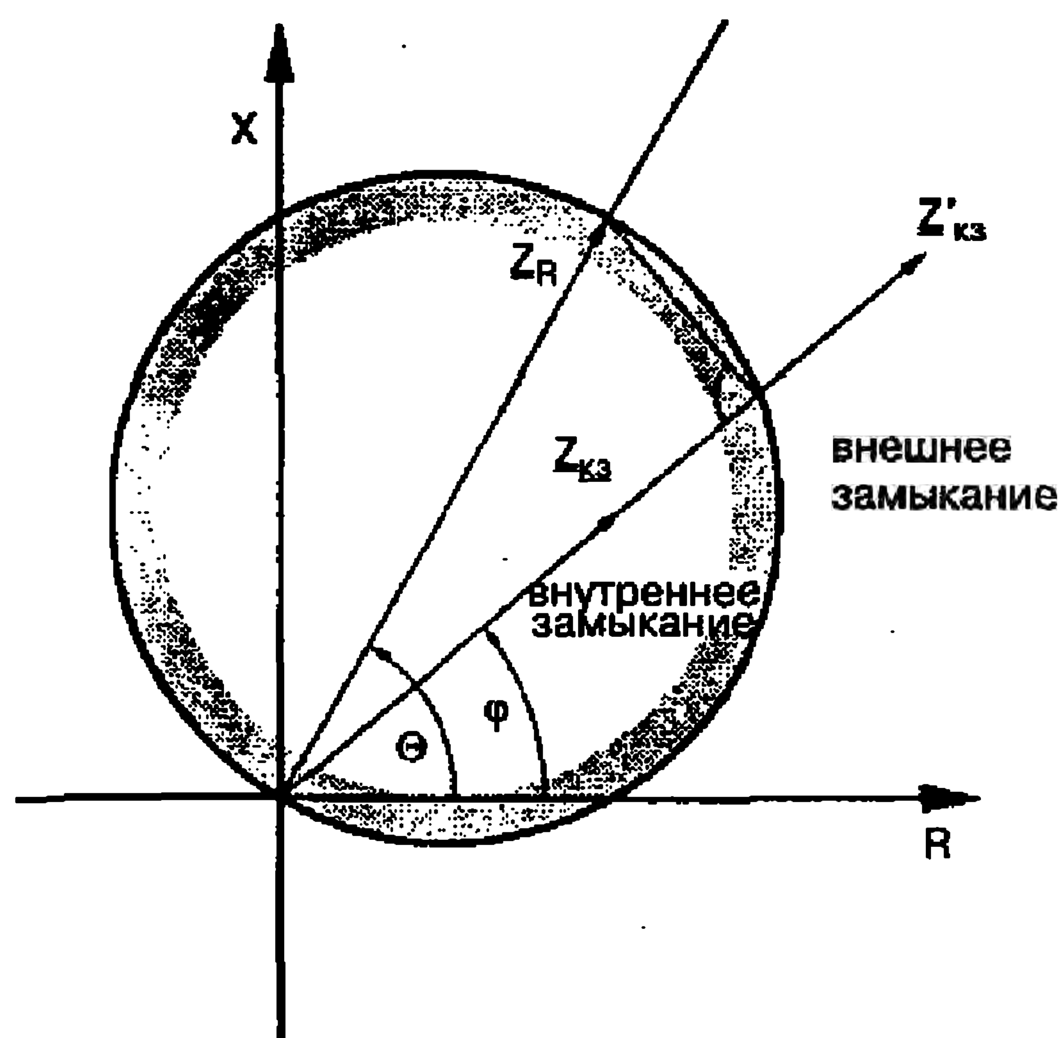


Рис. 3.6, б. МНО-характеристика (основная окружность)

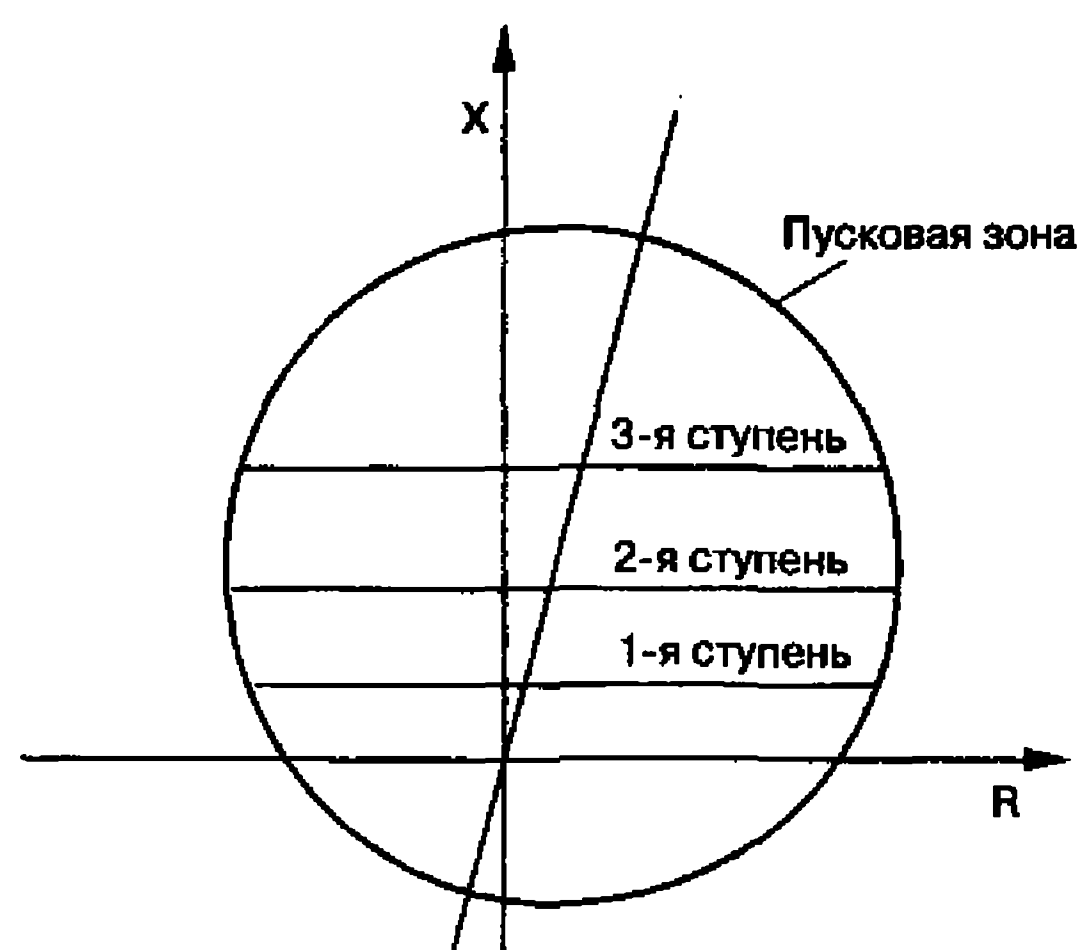


Рис. 3.7. Комбинированная характеристика из окружности и прямых линий

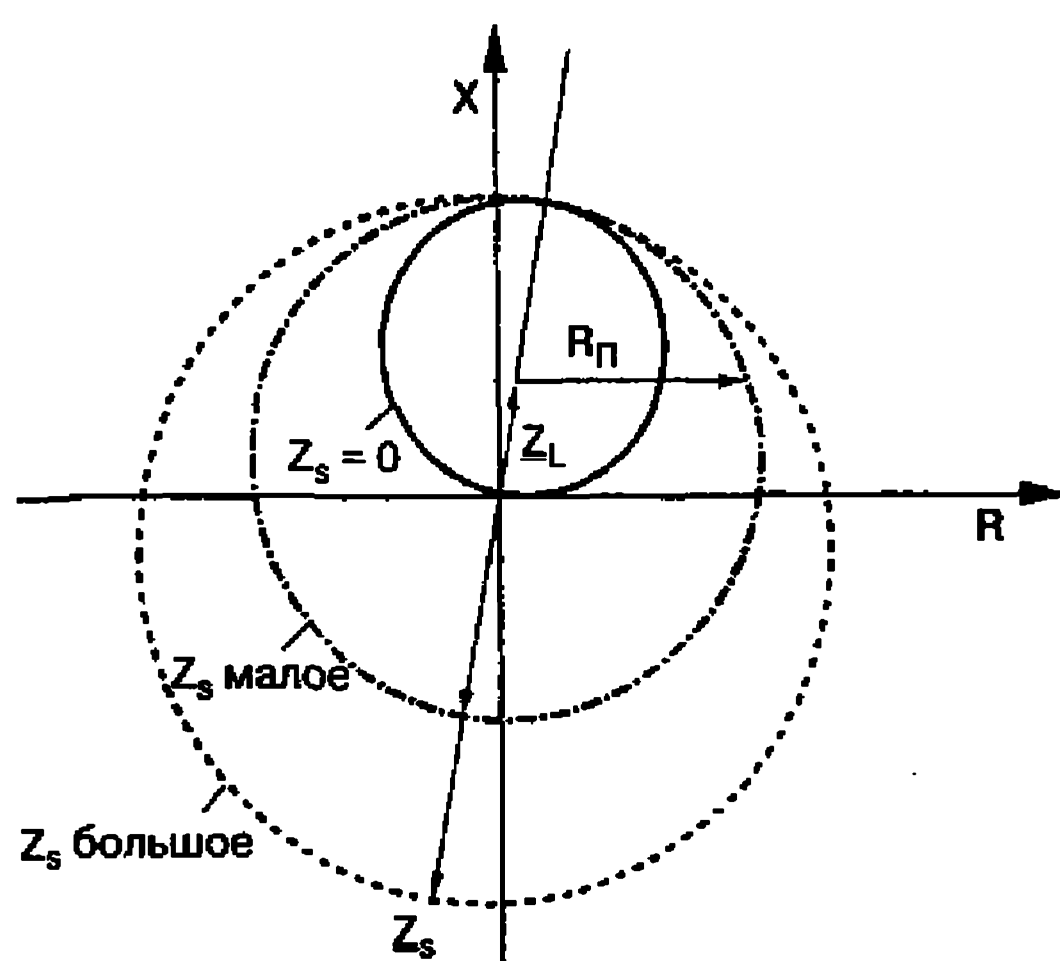


Рис. 3.8. Поляризованная МНО-окружность

жительных сопротивлений R круговой характеристикой (рис. 3.5).

Для определения расстояния до места повреждения в дистанционной защите может быть использована только реактивная составляющая X_K сопротивления. На активную составляющую оказывает существенное влияние переходное сопротивление в месте повреждения. Характеристика такого реле (реле реактивного сопротивления) может быть практически параллельна оси R. Зона действия в направлении R должна быть ограничена для предотвращения срабатывания в режиме

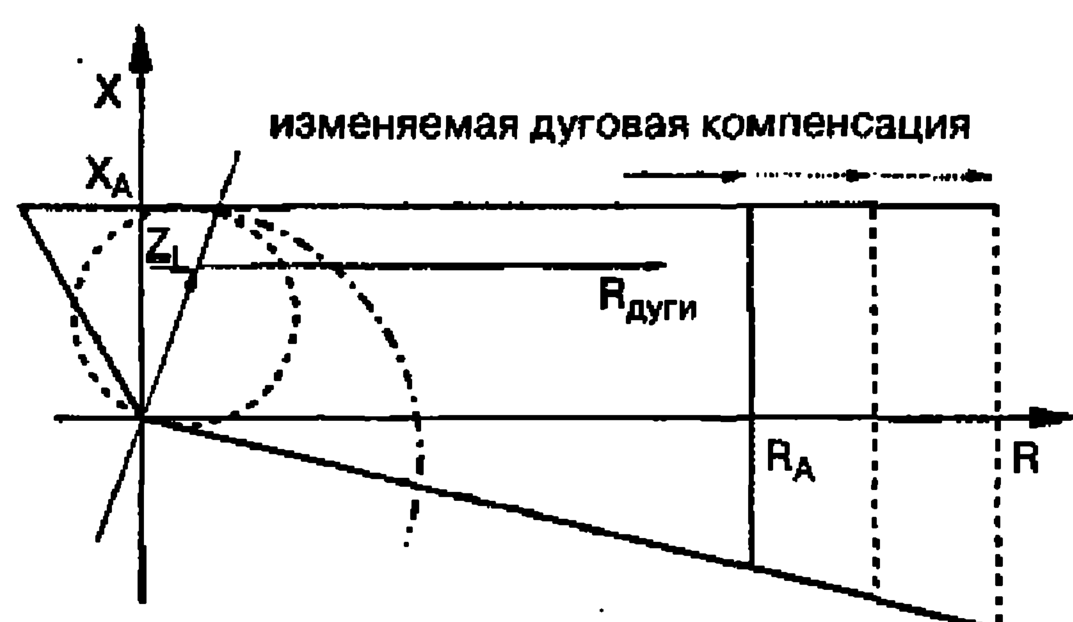


Рис. 3.9. Многоугольная характеристика срабатывания (четырехугольная)

нагрузки. Для получения такой характеристики в электромеханических реле использовали различные комбинации окружностей и прямых линий (рис. 3.7). МНО-характеристика с поляризацией[1] напряжением неповреждённой фазы также позволяет учесть сопротивление дуги. В этом случае, диаметр окружности изменяется в соответствии с полным сопротивлением источника (системы) $\underline{Z}_S$ (рис. 3.8). Достаточный охват переходного сопротивления $R_п$ достигается только при сравнительно слабой подпитке, т. е. при большом полном сопротивлении источника [3.3]. В этом смысле, идеальными являются многоугольные характеристики статических реле (рис. 3.9) [3.4].

При выполнении дистанционной защиты на аналого-статической элементной базе используют принцип сравнения фаз электрических величин. Сигналы $\Delta\underline{U}$ и $\underline{U}_{оп}$ преобразуют в импульсы прямоугольной формы. Компаратор определяет их совпадение. Рис. 3.10 иллюстрирует это для МНО-характеристик и четырёхугольников. $\underline{Z}_R$ в обоих случаях определяет границу зоны срабатывания (полное сопротивление реле). Характеристику в виде ок-

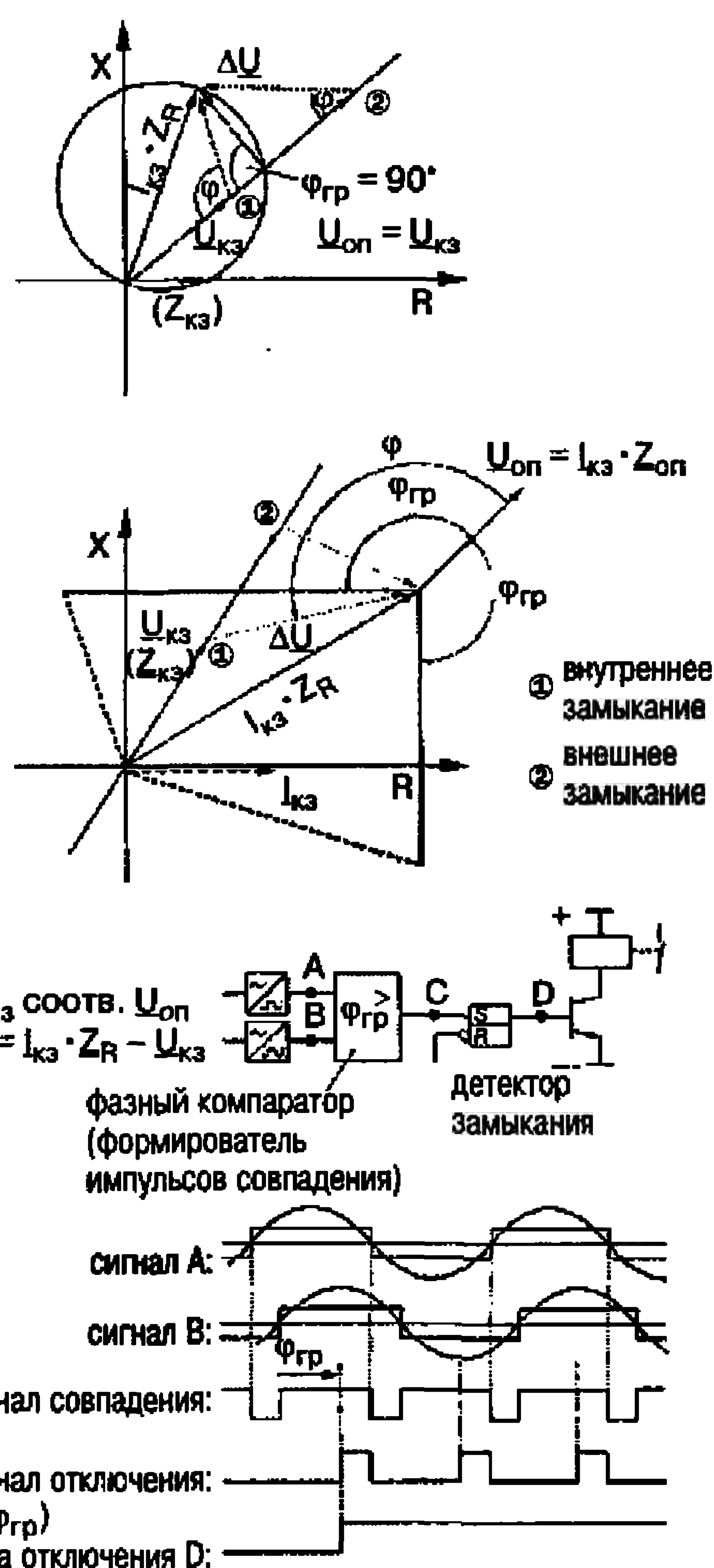


Рис. 3.10. Фазное сравнение (логика совпадения)

ружности получают путём измерения угла φ между $\Delta\underline{U}$ и напряжением короткого замыкания $\underline{U}_{КЗ}$. Для круговой характеристики границе зоны соответствует угол $\varphi_{гр} = \frac{\pi}{2}$. При внутренних КЗ измеряемый угол $\varphi > \frac{\pi}{2}$, длительность сигнала совпадения достаточна для срабатывания реле.

Для получения четырехугольной характеристики с прямым углом измеряется угол φ между опорным вектором $\underline{U}_{оп} = \underline{I}_{КЗ} \cdot \underline{Z}_{оп}$

[1] Применение напряжений неповреждённых фаз в дистанционной защите описано в п.п. 3.3.

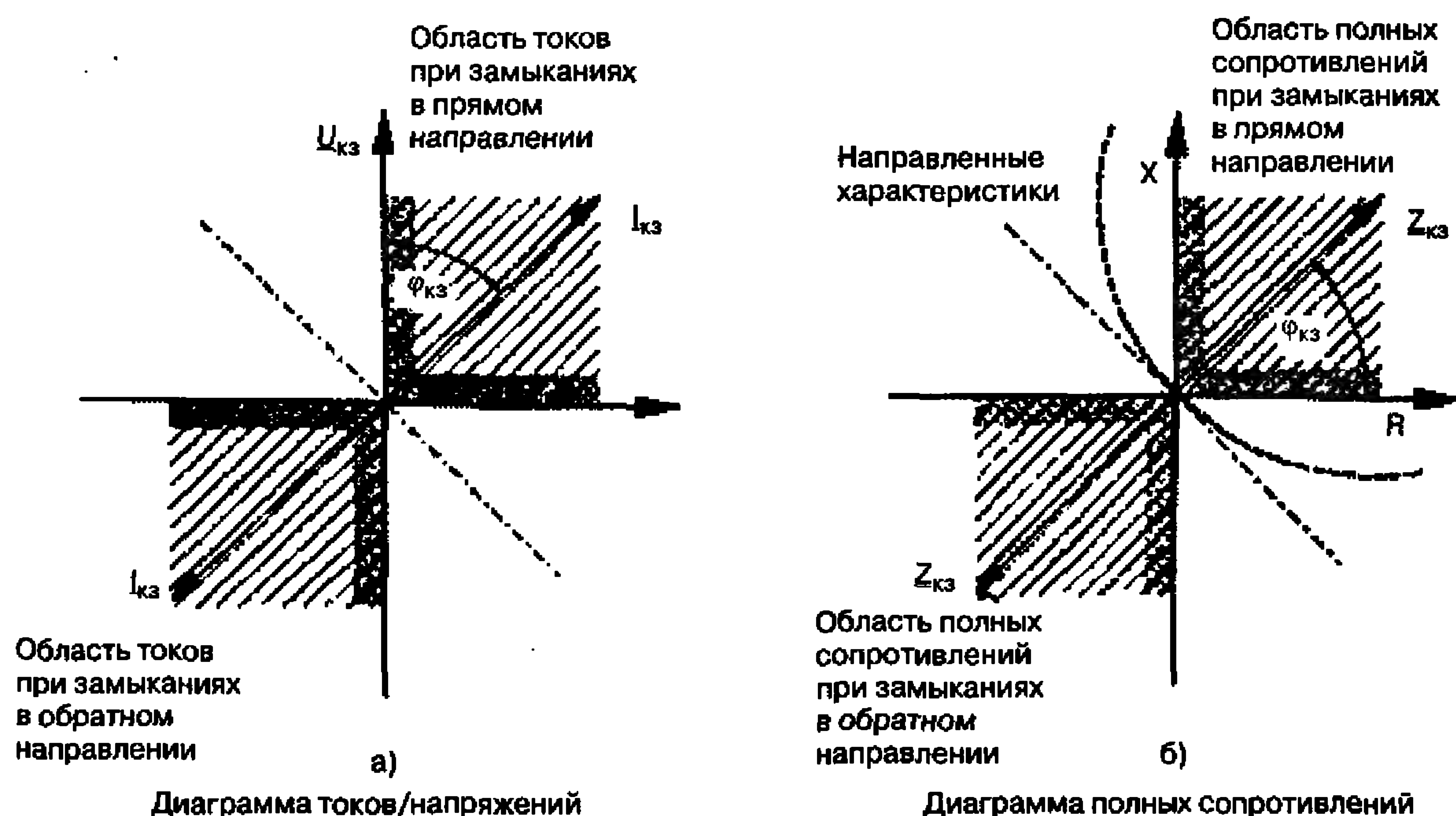


Рис.3.11. Определение направления повреждения

и $\Delta\underline{U} = \underline{I}_{КЗ} \cdot \underline{Z}_R - \underline{U}_{КЗ}$, причем граничный угол равен $\varphi_{гр} = 0{,}75\pi$. При внутренних КЗ $\varphi \geq \varphi_{гр}$ и реле срабатывает, а при внешних КЗ угол $\varphi < \varphi_{гр}$.

Цифровые реле используют определённый алгоритм вычисления сопротивления цепи замыкания (значения X и R) по измеренному току и напряжению. Затем результат математически сравнивается с границами выбранных характеристик срабатывания. Поэтому возможно использование оптимизированных характеристик практически любых форм.

Для круговых характеристик измеряемый угол между векторами в дальнейшем используется в качестве критерия, но вектора рассчитываются при помощи ортогональных фильтров (например, фильтр Фурье). Угол определяется расчётом сдвига фаз.

3.1.5. Направленные измерения

Защита на фидерах с двусторонним питанием (например, кольцевая сеть) должна быть направленной для предотвращения отключения фидеров, которые находятся вне зоны защиты.

Способ определения направления может быть представлен как на диаграмме напряжений, так и на диаграмме полных сопротивлений (рис. 3.11).

Если замыкание произошло в прямом направлении защиты, ток протекающий по контуру из индуктивности и активного сопротивления (в соответствии с выбранной фазировкой), отстаёт от напряжения, как показано на рис. 3.11, *а*, при условии, что наименование и подключение фаз соответствует фазировке реле. Угол $\varphi_{кз}$ равен приблизительно 80° при коротких замыканиях на воздушных линиях СВН, при КЗ на кабельных линиях он может быть ниже 20°. В пределе этот угол может достигать даже 0° при близких КЗ с сопротивлением дуги.[1]

[1] Особенности, существующие на ВЛ с продольной компенсацией, рассматриваются в п.п. 3.5.6.

При замыкании в обратном направлении («за спиной» у защиты), ток имеет направление, противоположное рассматриваемому.

Соответственно, изменяется и направление вектора сопротивления цепи КЗ: в первом случае, он расположен в I квадранте плоскости *Z*, а во втором — в III, т. е. его фаза изменяется практически на 180°.

Таким образом, для определения направления можно измерять угол между током и напряжением.

Измерительные цепи традиционных реле спроектированы таким образом, что направленная характеристика представляет собой прямую линию на диаграмме напряжений или сопротивлений.

В цифровых реле возможен тот же способ определения направления на основе анализа знака вычисленного значения полного сопротивления.

Следует отметить, что круговые характеристики, представленные на рис. 3.5 и 3.6, *б*, по сути, являются направленными, т. е. в этих случаях дополнительного определения направления не требуется.

Для определения направления рассматриваемым способом используется напряжение контура замыкания. Его недостатком является то, что при КЗ, близких к месту установки реле, невозможно определение направления, т. к. теоретически напряжение может быть равно нулю. Поэтому, традиционные реле имеют так называемую «мертвую зону» при напряжении короткого замыкания ниже 0,1 В.

Напряжения неповреждённых фаз обычно применяются в механических и аналоговых статических реле, устанавливаемых на линиях высокого и сверх высокого напряжения. В данном случае напряжение неповреждённой фазы используется в качестве поляризующего («кросс-поляризация»).

Например, междуфазное напряжение L2-L3 (В-С) используется при замыкании фазы L1 (А) на землю. Естественно, соответствующая фазная компенсация должна быть применена в реле в этом случае.

При трёхфазном замыкании, когда все фазы повреждены, используется напряжение, предшествовавшее короткому замыканию. С этой целью в аналоговых реле необходимо использовать сложную комплексную память напряжений (резонансная цепь), поэтому этот способ используется только для защиты цепей СВН.

В цифровых реле измеренное значение хранится в памяти. Реле может определить направление короткого замыкания по записанному в предшествующем КЗ режиме напряжению, зависящему от объёма памяти (до 2 с в 7SA522).

Определение направления с помощью напряжения неповрежденных фаз и его запоминания имеет особое значение для линий с последовательной компенсацией. Это подробно описано в п.п. 3.5.6.

3.1.6. Пуск (определение повреждения)

Первичное назначение пусковой функции заключается в определении и классификации короткого замыкания в энергосистеме.

Она должна обладать фазной селективностью, т. е. правильно определять повреждённые фазы, без излишнего пуска на неповреждённых фазах.

Это имеет особое значение при однофазных коротких замыканиях, когда используется однофазное автоматическое повторное включение (ОАПВ).

В случае переключаемых дистанционных реле с одним измерительным элементом, пусковой орган управляет выбором измеряемых значений.

Более того, срабатывание и возврат ПО используется для определения моментов начала и конца КЗ — например, при срабатывании ПО запускаются таймеры (органы выдержки времени) и цифровой осциллограф.

Комментарий:

В классических американских дистанционных защитах для каждой зоны и для каждого вида КЗ предусматривались отдельные измерительные системы. Все они независимо присоединялись к цепям отключения. Измерительные системы для трёх типов междуфазных или трёх видов фазных замыканий на землю объединялись в одно устройство (зональный блок)[1]. Отсчёт выдержек времени резервных ступеней начинался с момента срабатывания соответствующей измерительной системы. Это означало, что выдержки времени напрямую зависели от зоны защиты. Дополнительных мер для обеспечения фазной селективности при однофазных замыканиях на землю не требовалось, т. к. практически повсеместно применялось трёхфазное АПВ. В тех редких случаях, когда устанавливалось однофазное АПВ, предусматривался внешний фазный селектор, принцип работы которого основывался на определении симметричных составляющих.

Благодаря описанным выше обстоятельствам не требовалась установка ПО. Этот принцип был применён и в цифровых реле. Итоговая структурная схема приведена на рис. 3.27 в п.п. 3.1.8.

В настоящее время фазная селективность и отстройка от нагрузки обеспечиваются программным способом. Примером этого служит реле 7SA522.

Критерием для реализации пусковой функции может служить повышение тока, снижение напряжения и изменения в значении полного сопротивления.

Пуск по току

Это наиболее простой и наиболее быстрый метод обнаружения замыкания.

Он может быть использован в сетях с небольшими сопротивлениями линий и сильной подпиткой, т. е. там, где токи КЗ имеют достаточно большие значения. Наименьший ток короткого замыкания должен быть, по крайней мере, в 2 раза больше максимального тока нагрузки. Уставки ПО должны быть примерно в 1.3 раза больше максимального тока нагрузки в фазах и составлять не менее $0{,}5I_{ном}$ (номинальный ток трансформатора тока) для тока нулевой последовательности.

Для параллельных линий необходимо учесть, что если одна из линий отключена, то по другой линии, по крайней мере, какое-то время, может протекать двойной ток. В таких случаях уставка ПО, реагирующего на ток фазы, должна быть удвоена.

Необходимо заметить, что для организации пуска в сетях с заземленной нейтралью самого по себе тока замыкания на землю не достаточно. Для правильного выбора расчётной петли ток КЗ должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить срабатывание соответствующего реле.

Для проверки надёжности определения короткого замыкания должно быть рассмотрено двухфазное КЗ, т.к. в этом случае ток $I_K^{(2)} = \sqrt{3}/2 \cdot I_K^{(3)}$.

В сети с заземленной нейтралью ПО необходимо проверять и при однофазных ко-

[1] В США, дистанционные защиты в системах распределения энергии на высоком напряжении часто применяются только для междуфазных замыканий. Защита от замыканий на землю осуществляется либо схемой сравнения направлений, либо только токовой защитой нулевой последовательности с обратно зависимой характеристикой выдержки времени. Это является причиной разделения устройств для определения междуфазных замыканий и замыканий на землю.

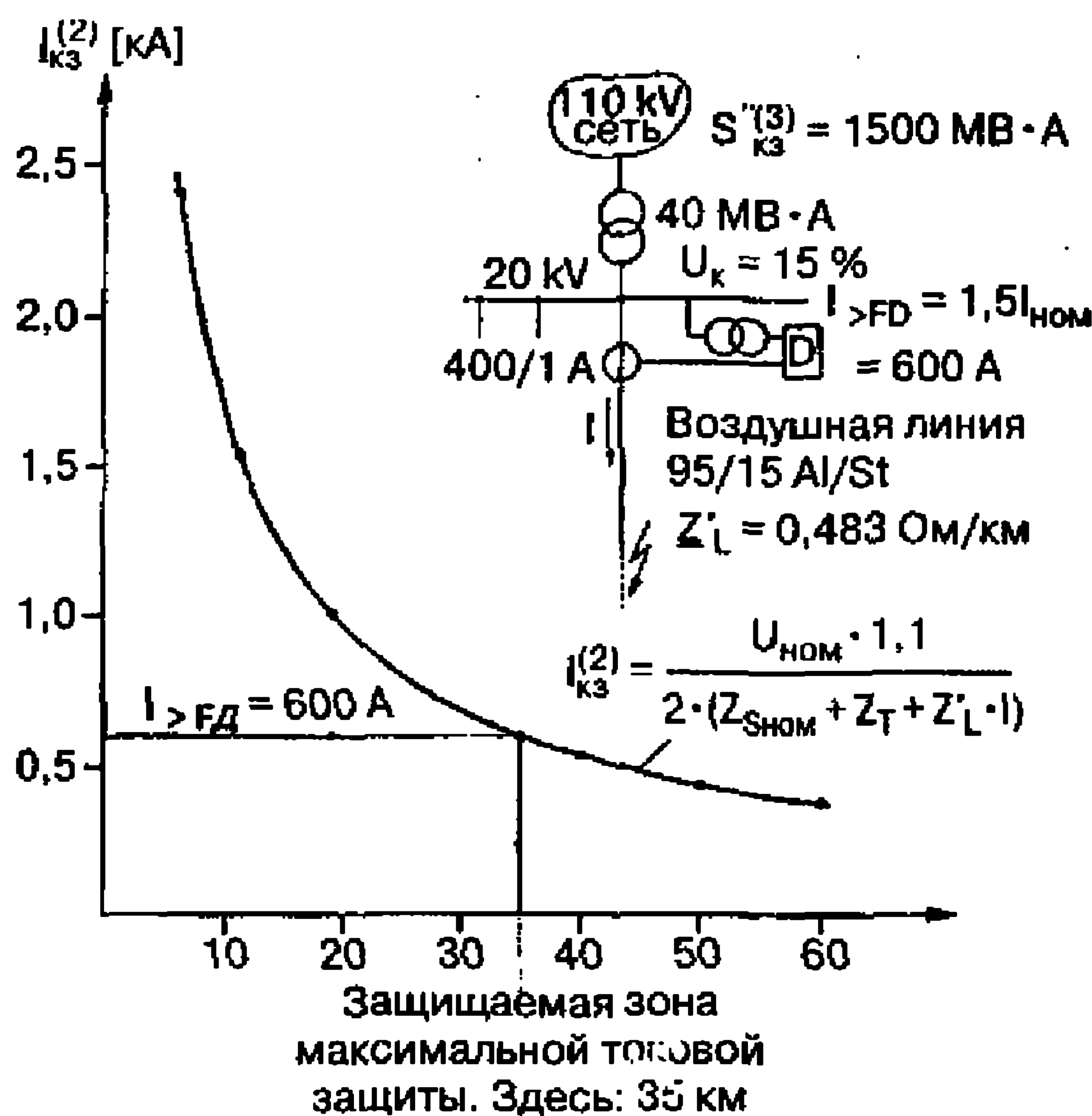


Рис. 3.12. Защищаемая зона максимальной токовой защиты (пускового органа) при междуфазных КЗ

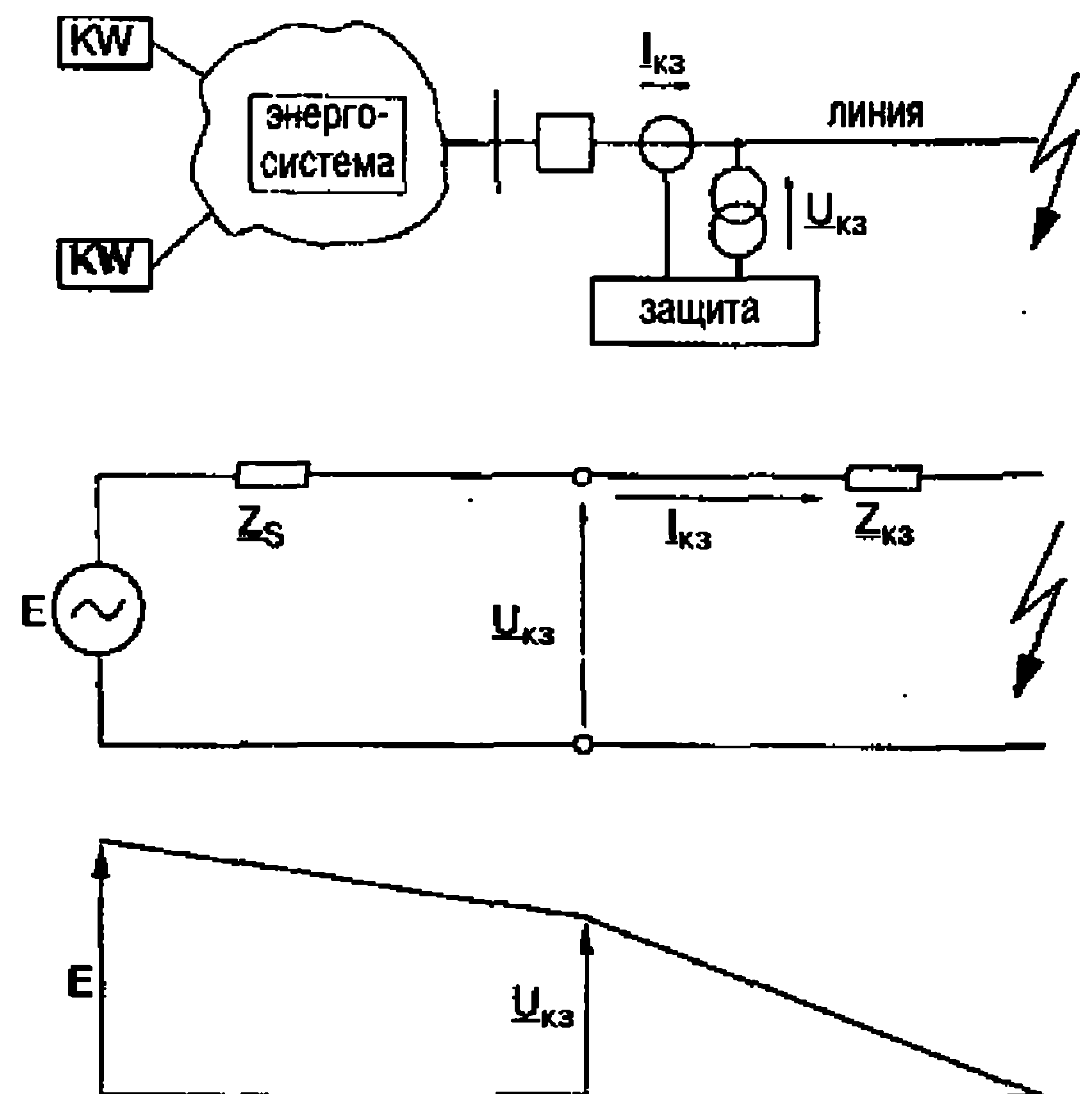


Рис. 3.13. Напряжение в месте установки реле при КЗ

ротких замыканиях. На рис. 3.12 представлен пример расчёта для междуфазных КЗ.

Комбинированный пуск по току и напряжению (U < и I >)

По следующим причинам токи короткого замыкания могут оказаться недостаточными для обеспечения токового пуска:

⇒ Маломощный источник (высокое сопротивление источника),

⇒ Наличие параллельных линий,

⇒ Ограничение тока при замыкании на землю активным или реактивным сопротивлением в нейтральной точке трансформатора.

В этих случаях важным дополнительным критерием срабатывания является существующее напряжение.

Напряжение, возникающее в месте установки реле, зависит от соотношения между сопротивлением источника и сопротивлением контура замыкания (расстоянием до места замыкания) (рис. 3.13).

Для того чтобы предотвратить ложное срабатывание реле на отключенном фидере (нет напряжения), пуск по напряжению объединен с контролем тока на уровне (0,2—0,5) $I_{ном}$, т. е. срабатывание по напряжению разрешено только когда в цепи протекают минимальные токи.

При комбинированном пуске порог напряжения связан с током так, что чувствительность срабатывания по напряжению повышается при увеличении тока. На рис. 3.14 представлена результирующая характеристика срабатывания.

Уставка I >> соответствует срабатыванию пусковой ступени по току. Обычно используются уставки: $I > = 0,5 \cdot I_{ном}$ и $I >> = 2,5 \cdot I_{ном}$, $U (I >) = 70\ \% \cdot U_{ном}$ и $U (I >>) = 100\ \% \cdot U_{ном}$.

Система с эффективно заземлённой нейтралью

Комбинированный пуск (или пуск по сопротивлению, описываемый ниже) необходим в сетях с заземленной нейтралью

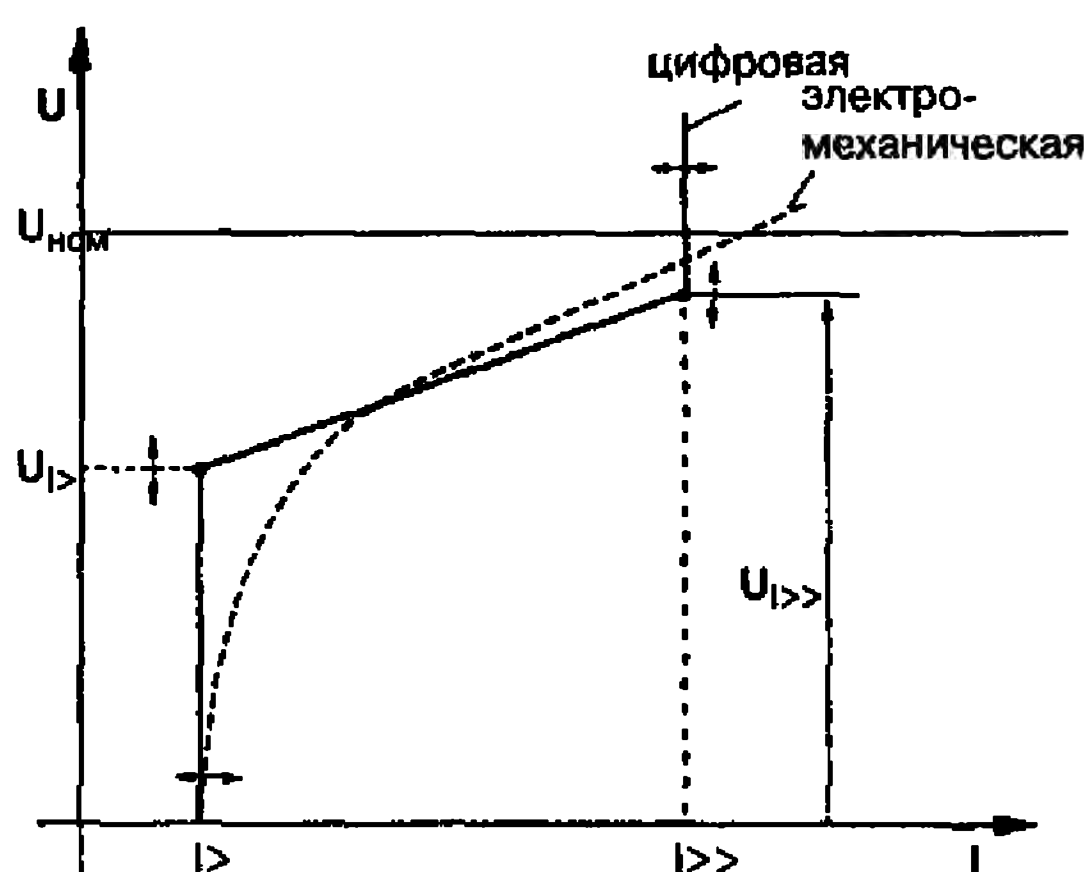


Рис. 3.14. Характеристика комбинированного пуска

для обеспечения селективного выбора повреждённой фазы при определении замыкания. Простого пуска по току в общем случае не достаточно. В сетях с заземленной нейтралью возможно протекание тока по неповреждённым фазам в случаях возникновения замыкания на землю. Уставка токового пускового органа (максимальной токовой защиты) должна быть выше этих токов. Эти токи возрастают из-за различия составляющих нулевой и прямой последовательности на двух концах линии.

На рис. 3.15 представлен предельный случай, когда на одном конце линии отсутствует питание, но во всех фазах при однофазном КЗ на землю имеются одинаковые токи (Bauch's paradox).

Селективное определение однофазного замыкания возможно лишь при использовании фазных напряжений (или соответствующих сопротивлений).

Обычно в реле используют междуфазные напряжения, а при замыканиях на землю предусматривают переключение на фазные напряжения (при появлении тока в земле — тока нулевой последовательности или напряжения смещения).

Сети с изолированной нейтралью или заземлённые через катушку Петерсона

В этих системах однофазные замыкания на землю выявляются специальной защитой от замыканий на землю, действующей на сигнал. Отключения не происходит, т. к. не существует замкнутого накоротко контура, и фидер может оставаться включённым в работу без каких-либо неприятностей для потребителя до тех пор, пока не будут произведены соответствующие изменения в сети.

Тем не менее, неверное выявление повреждения дистанционной защитой должно быть предотвращено любыми способами, т. к. напряжение на повреждённой фазе равно нулю во всей системе и дистанционные измерения приведут к неверному срабатыванию.

По этой причине в сетях с изолированной или заземленной через катушку Петерсона нейтралью измерение в контуре фаза-земля может быть разрешено только при двойных замыканиях на землю. Это может быть достигнуто применением в устройстве, определяющем протекание тока в земле (нулевой последовательности), уставки выше тока однофазного замыкания, если дуга замыкания не погашена катушкой Петерсона.

В разветвлённых сетях ток при однофазных замыканиях на землю (дуга не погашена) может достигать значений, соответствующих току в земле при двойных замыканиях. Поэтому, используя только ток нулевой последовательности, нельзя различить эти виды повреждения. В этом случае необходимо использование напряжения прямой последовательности или междуфазных напряжений (см п.п. 5.2.2).

Правильное определение двойного замыкания на землю по току в земле возможно только на участке между двумя точками замыканиями на землю (рис. 3.16).

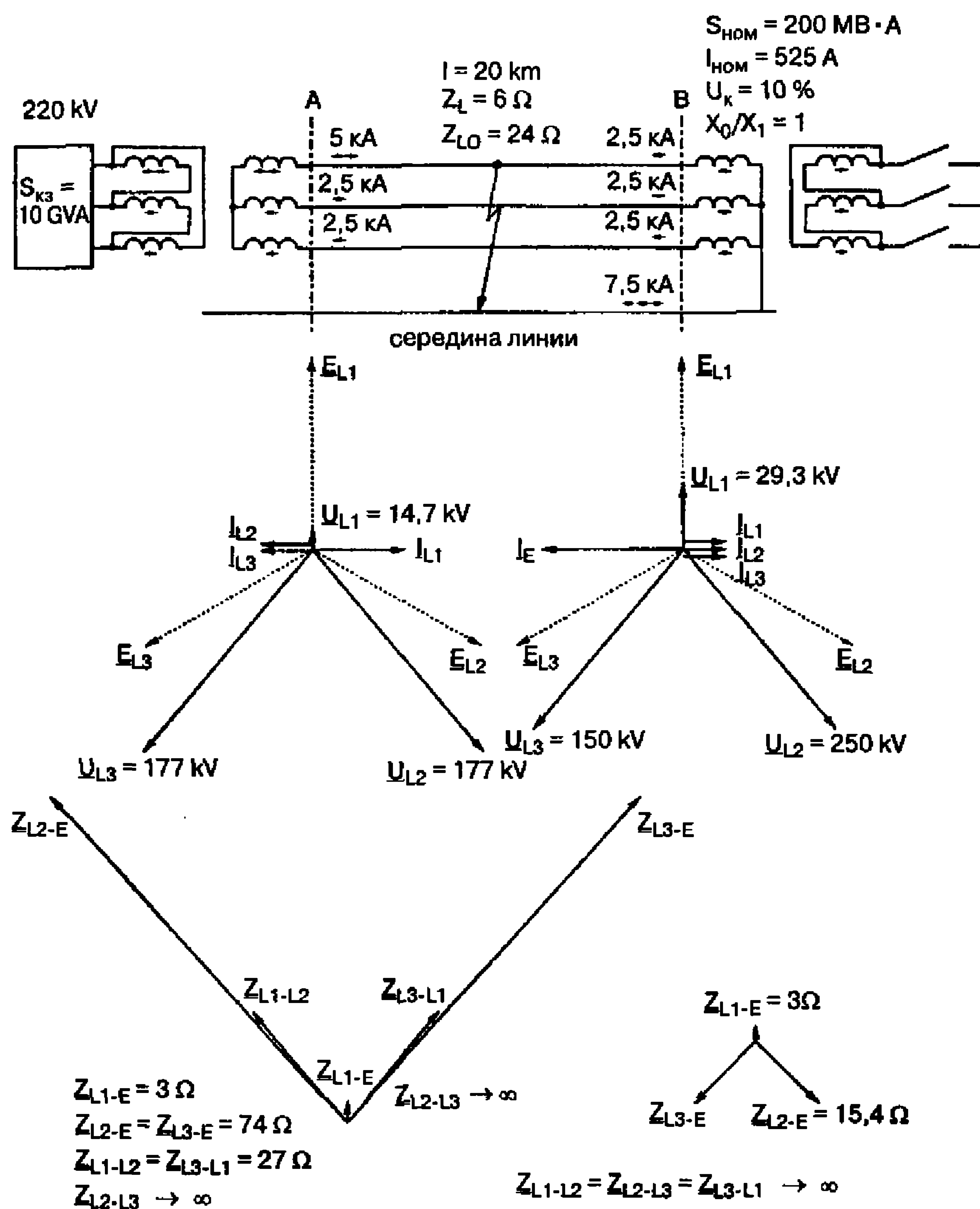


Рис. 3.15. Предельный случай распределения токов при однофазном КЗ на землю

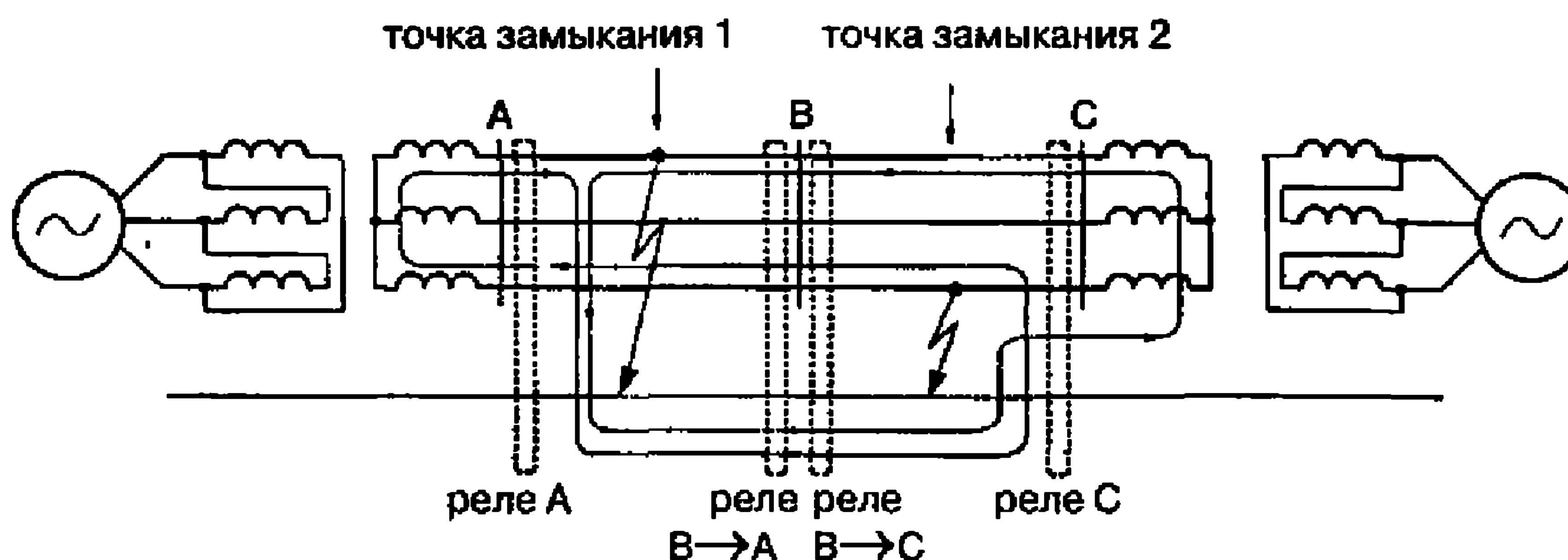


Рис. 3.16. Распределение токов при двойных замыканиях

Определение двойных замыканий посредством определения напряжения смещения $\underline{U}_E = \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3}$ ($\underline{U}_E = 3\underline{U}_0$, L1, L2, L3 — A, B, C) возможно и вне этой зоны, но в настоящее время этот способ не применяется. Поэтому со стороны питания фиксируется и измеряется двухфазное замыкание. Измеренное значение сопротивления соответствует среднему значению расстояния между двумя точками замыканий на землю. (Определение расстояния при двойных замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью или заземленной через катушку Петерсона детально рассмотрено в п.п. 5.2.2)

Комбинированный направленный пуск (U/I/φ в зависимости от угла)

На воздушных линиях углы токов КЗ значительно больше, чем угол тока нагрузки. Например, на линиях электропередачи угол тока нагрузки лежит в диапазоне от −30° до 30°, а угол тока короткого замыкания > 70°. Поэтому угол между током и напряжением может быть использован как дополнительный параметр срабатывания при комбинированном пуске. Угол используют для повышения чувствительности комбинированного пуска (I_φ >, U ($_{I_\varphi >}$)), если измеренный угол КЗ выше угла нагрузки и находится в допустимом диапазоне (рис. 3.17).

Определение угла расширяет зону действия (досягаемости), что позволяет фиксировать замыкания в конце длинных линий или на смежных линиях (см. п.п. 3.5.2).

Пуск по сопротивлению

Как показано на рис. 3.3 диаграмма сопротивлений также хорошо подходит для

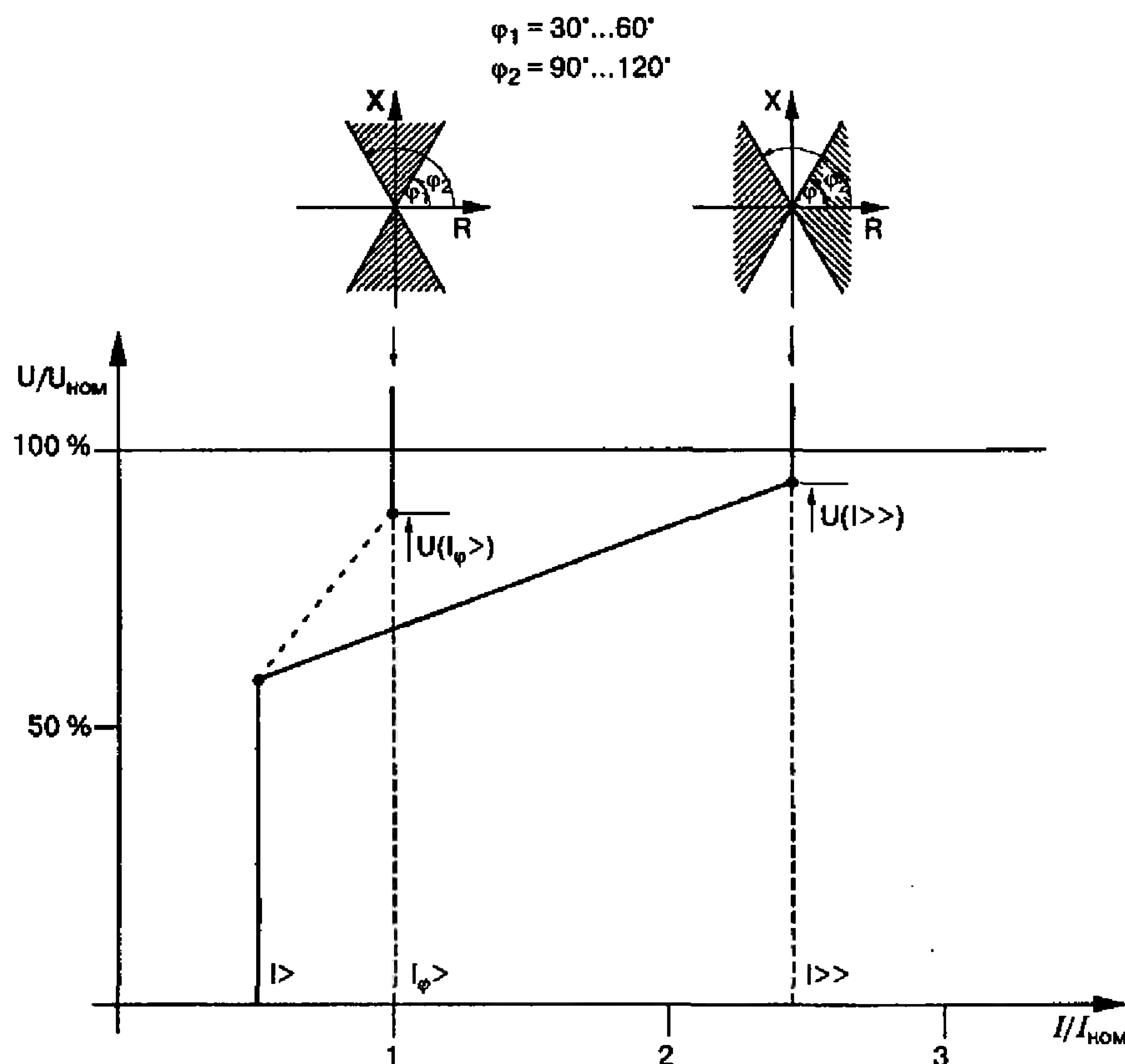


Рис. 3.17. Пуск по U/I/φ (направленный)

распознавания режима КЗ. В этом случае в цифровых устройствах параметры всех 6-ти возможных контуров замыканий (L1-E, L2-E, L3-E, L1-L2, L2-L3, L3-L1) постоянно измеряются или вычисляются.

Характеристики срабатывания пусковых органов традиционных реле уже оптимизированы применением сочетания различных окружностей и прямых линий (рис. 3.18) с целью достижения:

— большой зоны действия в направлении X для определения удалённых коротких замыканий;

— достаточной компенсации сопротивления дуги за счёт расширения характеристики в направлении *R* с сохранением отстройки от режима нагрузки (сопротивления).

Однако, расширение области действия ПО может привести к тому, что сопротивления так называемых «здоровых» фаз («кажущиеся сопротивления»), измеряемые в процессе КЗ, могут попасть в область срабатывания и привести к неверному определению повреждения. В этом случае защита отключит все три фазы при однофазном замыкании и заблокирует АПВ (рис. 3.19).

Поэтому в традиционных реле значения уставок должны быть ограничены.

В этом плане цифровые реле обладают определённым важным преимуществом, заключающимся в возможности получения характеристики практически любой необходимой формы (рис. 3.20).

Кроме того, нет необходимости ограничивать область срабатывания с целью исключения сопротивлений «здоровых» фаз, т.к. фазная селективность обеспечивается другими способами, в том числе,

— цифровым сравнением сопротивлений контуров КЗ;

— сравнением векторов симметричных составляющих (токов);

— использованием аварийных составляющих токов (компенсация влияния нагрузки);

— сопоставлением с типовыми моделями повреждений.

Обычно наименьшее сопротивление

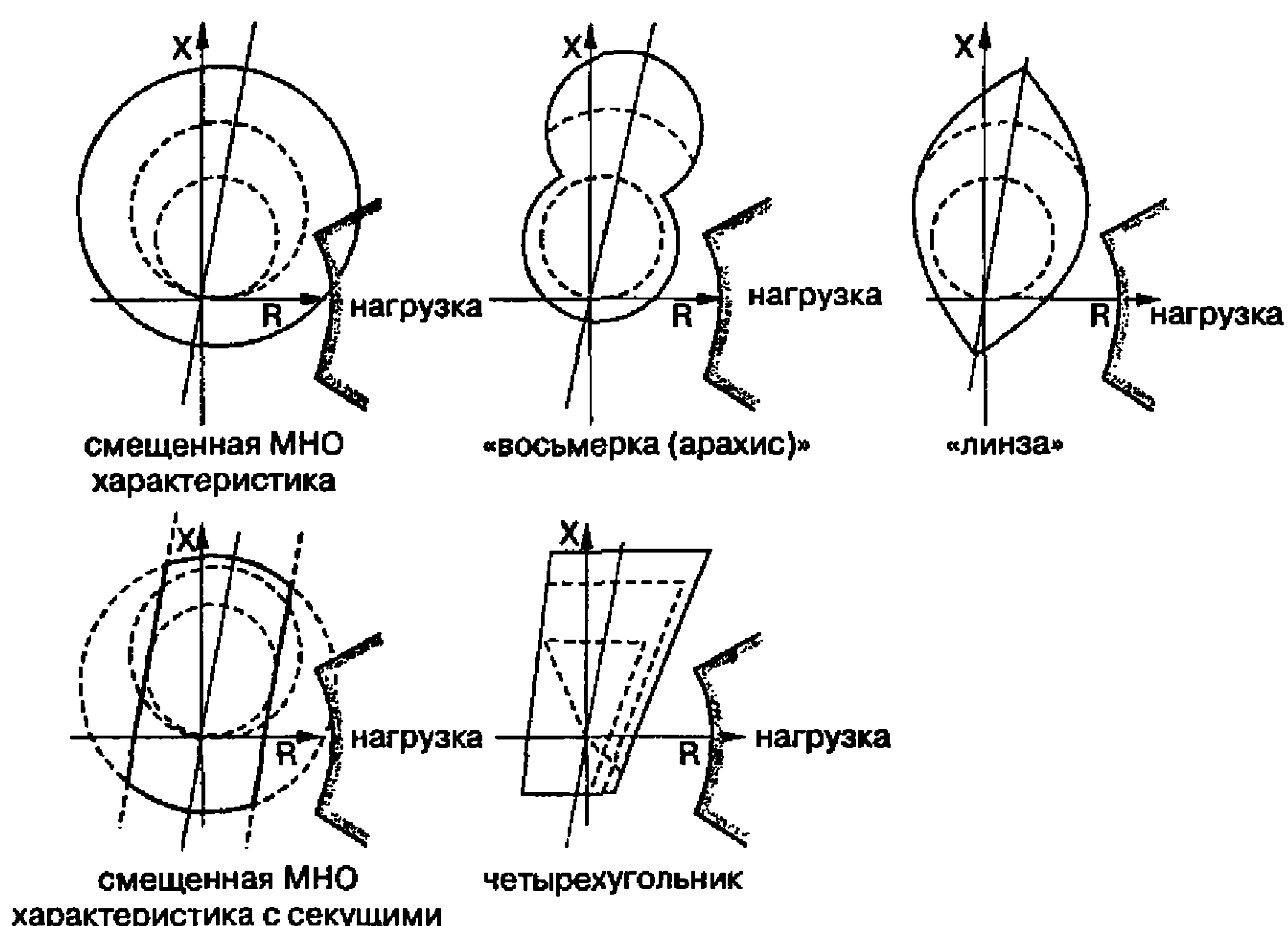
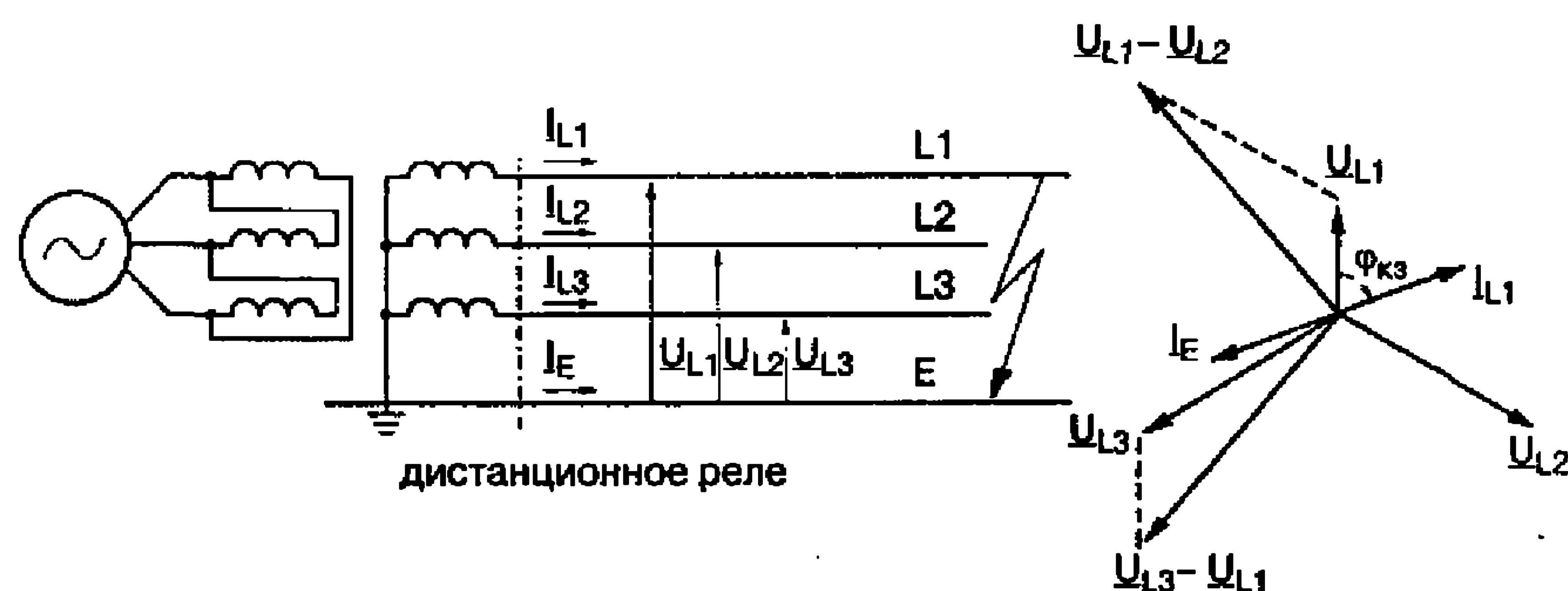


Рис. 3.18. Характеристики срабатывания традиционных реле



Сопротивление поврежденного контура

$$Z_{L1\text{-}E}=\frac{\underline{U}_{L1}}{\underline{I}_{L1}-\underline{K}_E\cdot\underline{I}_E}$$

Сопротивление неповрежденных («здоровых») контуров:

$$Z_{L2\text{-}E}=\frac{\underline{U}_{L2}}{\underline{I}_{L2}-\underline{K}_E\underline{I}_E}$$

$$Z_{L2\text{-}E}=\frac{\underline{U}_{L3}}{\underline{I}_{L3}-\underline{K}_E\cdot\underline{I}_E}$$

$$Z_{L1\text{-}L2}=\frac{\underline{U}_{L1}-\underline{U}_{L2}}{\underline{I}_{L1}\cdot\underline{I}_{L2}}$$

$$Z_{L2\text{-}L3}=\frac{\underline{U}_{L2}-\underline{U}_{L3}}{\underline{I}_{L2}-\underline{I}_{L3}}$$

$$Z_{L3\text{-}L1}=\frac{\underline{U}_{L3}-\underline{U}_{L1}}{\underline{I}_{L3}-\underline{I}_{L1}}$$

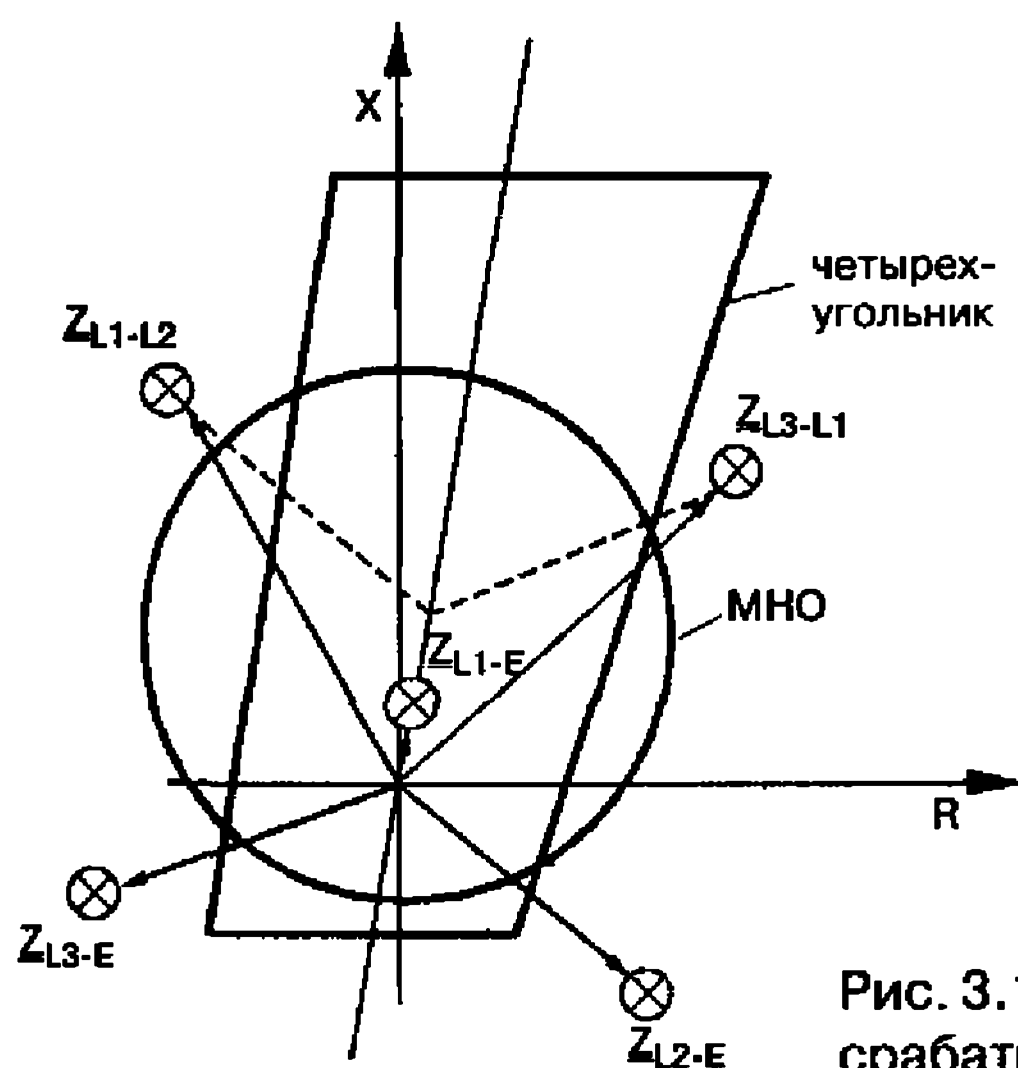
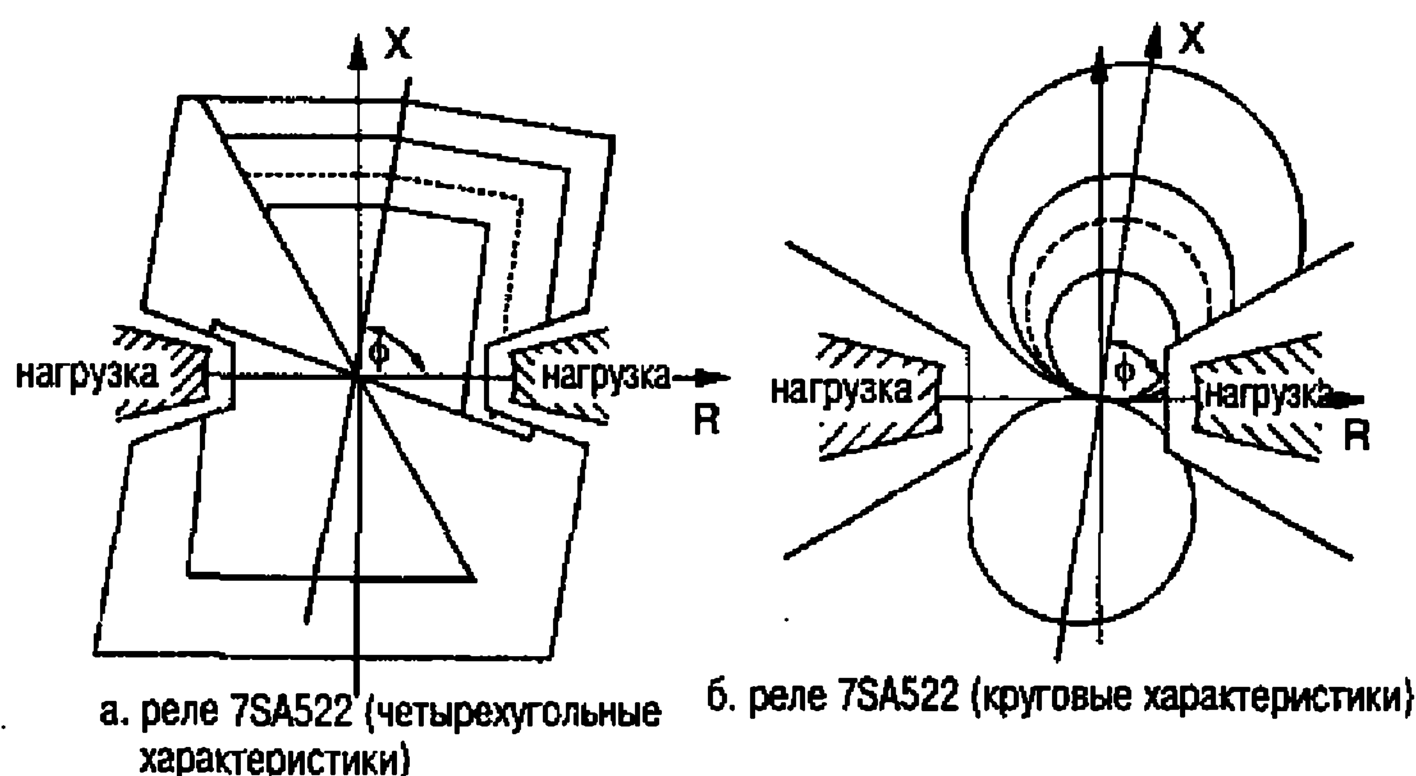


Рис. 3.19. Традиционная защита: ограничение области срабатывания для обеспечения фазной селективности

петли определяет вид КЗ. Например, однофазное КЗ на землю фиксируется в том случае, когда сопротивление одной петли фаза—земля будет меньше, чем сопротивления двух других (например, в 1,5 раза).

Чем ближе значения сопротивлений петель друг к другу, тем более сложные алгоритмы выбора поврежденных фаз используются (рис. 3.21).

Сравнение углов симметричных со-



а. реле 7SA522 (четырехугольные характеристики)

б. реле 7SA522 (круговые характеристики)

Рис. 3.20. Оптимизированные характеристики срабатывания

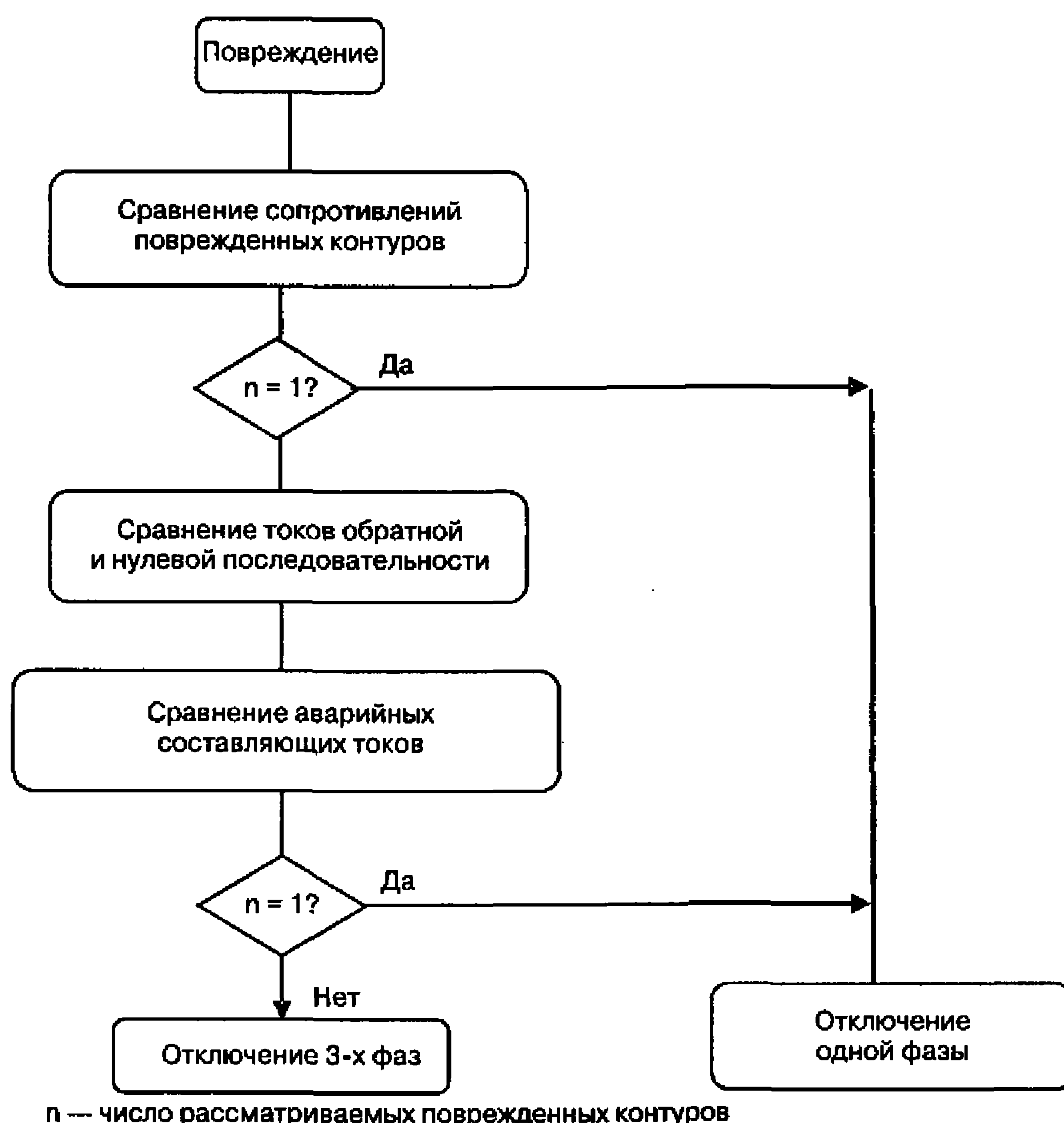


Рис. 3.21. Структурная схема алгоритма выбора поврежденной фазы в современных цифровых дистанционных реле

ставляющих тока — это классический метод, который был использован в традиционных реле. В случае однофазного замыкания на землю фазы токов обратной и нулевой последовательностей поврежденной фазы практически равны (< 30°), тогда как для неповрежденной фазы сдвиг между ними составляет 120°.

При двухфазных КЗ на землю расхождение фаз токов обратной и нулевой последовательности наблюдается в обеих поврежденных фазах. Поэтому здесь должен быть использован дополнительный критерий, например, учитывающий снижение линейного напряжения или сопротивления.

При использовании для определения поврежденной фазы метода аварийных составляющих (компенсации тока нагрузки) токи режима, предшествующего КЗ, запоминаются и затем вычитаются из полного тока КЗ. Тем самым выделяется аварийная составляющая тока в месте установки защиты, позволяющая полностью определить вид КЗ по типичным моделям.

При однофазном замыкании токи неповрежденных фаз значительно ниже и сдвинуты на 180° по сравнению с током

поврежденной фазы. При двухфазном замыкании на землю токи в поврежденных фазах больше и практически противоположны друг другу (от 120° до 180°, в зависимости от условий заземления).

Таким образом могут быть определены поврежденные фазы на сильно нагруженных и длинных линиях, где значения сопротивлений петель в нагрузочном режиме и в режиме короткого замыкания близки между собой [5.21].

В действительности процедура выбора поврежденной фазы является более сложной и включает в себя также адаптированные критерии выбора для замыканий в течение времени бестоковой паузы ОАПВ.

Изображение пусковых характеристик

Характеристики срабатывания токовых и комбинированных пусковых органов обычно изображают на U/I диаграмме (рис. 3.17). Если известно сопротивление источника, U/I характеристика может быть перенесена на диаграмму сопротивлений (рис. 3.22). В этом случае используют следующие соотношения:

Пуск по току: $|Z + Z_S| \leqslant \frac{1{,}1 U'_{ном}}{I\gg}$. (3.3)

Пуск по напряжению:

$$\left|\frac{Z}{Z_S + Z}\right| = \frac{U</U_{ном}}{1{,}1} \quad (3.4)$$

Графически данные неравенства представлены на рис. 3.22. Аппроксимация

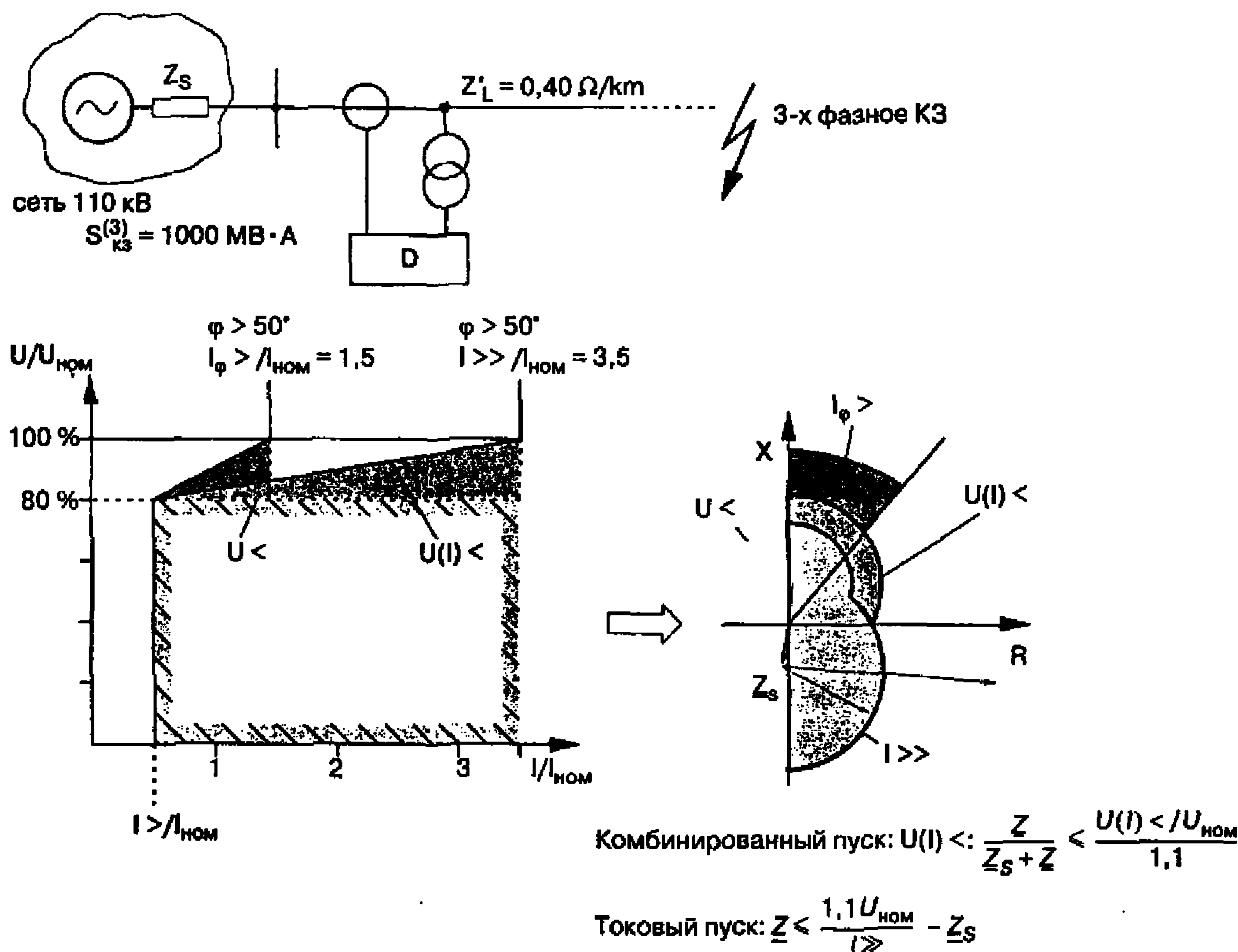


Рис. 3.22. Представление направленного пуска на плоскости сопротивлений

этой характеристики может быть произведена ступенчатым методом по известным соотношениям.

Такое изображение характеристик срабатывания встречается не часто. Преимущество использования комбинированного пуска заключается в том, что уставки рассчитываются по предельным значениям тока и напряжения, которые зависят от номинальных данных оборудования (например, допустимая перегрузка по току трансформатора) или от известных параметров режима сети (например, допустимое снижение напряжений в системе).

Защищаемая зона при КЗ в системе должна быть определена по токам коротких замыканий.

Характеристики срабатывания при использовании пуска по сопротивлению, естественно, всегда изображаются на диаграмме сопротивлений. Достоинством этого метода является то, что защищаемая зона не зависит от сопротивления источника, а также то, что защищаемые зоны имею фиксированные значения. Кроме того, влияние качаний мощности в системе на поведение дистанционной защиты более чётко видно на диаграмме сопротивлений, т.к. известные способы блокировки при качаниях в системе основываются на измерении полного сопротивления (см. п.п. 3.1.11).

Однако, обратный переход от полного сопротивления на диаграмме сопротивлений к значению тока невозможен. Это означает, что, например, невозможно определить значение тока, при котором сработает защита в условиях перегрузки.

Фазная селективность играет важную роль. Она абсолютно необходима для выбора петли КЗ в дистанционной защите с переключением входных величин. Достичь этого при использовании комбинированного пуска намного проще, чем при использовании пуска по сопротивлению, где необходимо исключить влияние «кажущихся» сопротивлений (см. рис. 3.19). Возможно, это стало одной из причин широкого применения комбинированного пуска в Германии, где компактные реле с переключением входных величин повсеместно применялись в смешанных сетях среднего и высокого напряжения.

В других странах, дистанционная защита практически применялась только в магистральных системах электропередачи и всегда выполнялась без переключения входных величин. Фазная селективность выполнялась автоматически и однофазное АПВ применялось редко.

С применением цифровых реле ситуация изменилась.

С применением интеллектуальных алгоритмов, например, с использованием дополнительного сравнения полных сопротивлений, появилась возможность достижения абсолютной фазной селективности при использовании пуска по сопротивлению без ограничений уставок.

Тем не менее, оба типа пусковых характеристик имеют свои области применения.

Предпочтительное использование какого-либо типа основывается на историческом развитии.

В то время как комбинированный пуск широко используется в Германии и в некоторых других странах, весь остальной мир всегда использовал пуск по сопротивлению.

---

[1] $1{,}1U_{ном} = E$ соответствует напряжению на выводах генератора, которое обычно на 10 % больше напряжения системы (см. IEC909, руководство по расчёту токов КЗ). В особых случаях следует использовать действительное значение напряжения на выводах генератора; Z_S — сопротивление источника питания (системы).

3.1.7. Зоны дистанционной защиты (ступени)

На рис. 3.2 была представлена ступенчатая характеристика дистанционной защиты.

Она соответствует набору характеристик на диаграмме сопротивлений. Начало координат ($R = 0$; $X = 0$) соответствует месту установки реле, откуда измеряется расстояние.

На рис. 3.23 представлены четырехугольные (многоугольные) характеристики современных цифровых защит и круговые характеристики механических защит (R1KZ4).

Защищаемые зоны всегда определяются пересечением характеристик реле с линией полного сопротивления фидера.

В электромеханических защитах, как правило, применяются круговые характеристики полного сопротивления со смещением относительно начала координат. Измерительная цепь в этом случае выполнена так, что происходит автоматическое смещение окружности на половину ее радиуса в R-направлении для компенсации (охвата) сопротивления дуги. Уставка, которая соответствует радиусу r, должна быть рассчитана по соотношению, приведённому на рис. 3.24. Значение Z определяется пересечением окружности с линией, представляющей собой полное сопротивление защищаемой линии. Точка пересечения соответствует предварительно определённой защищаемой зоне. Поэтому, например, Z_{II} равно значению Z для зоны 2 при расчётах радиуса r_2 для этой зоны.

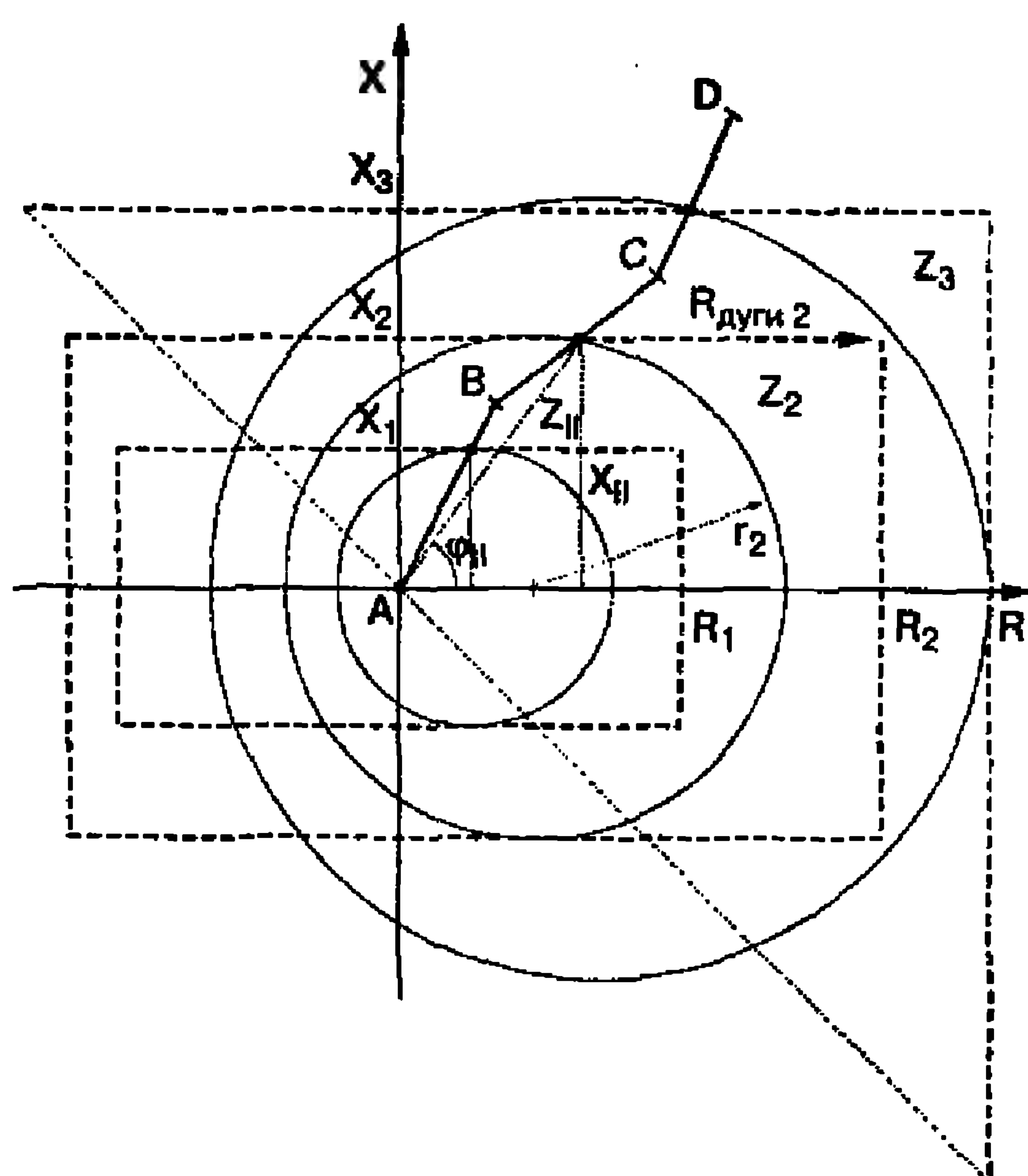
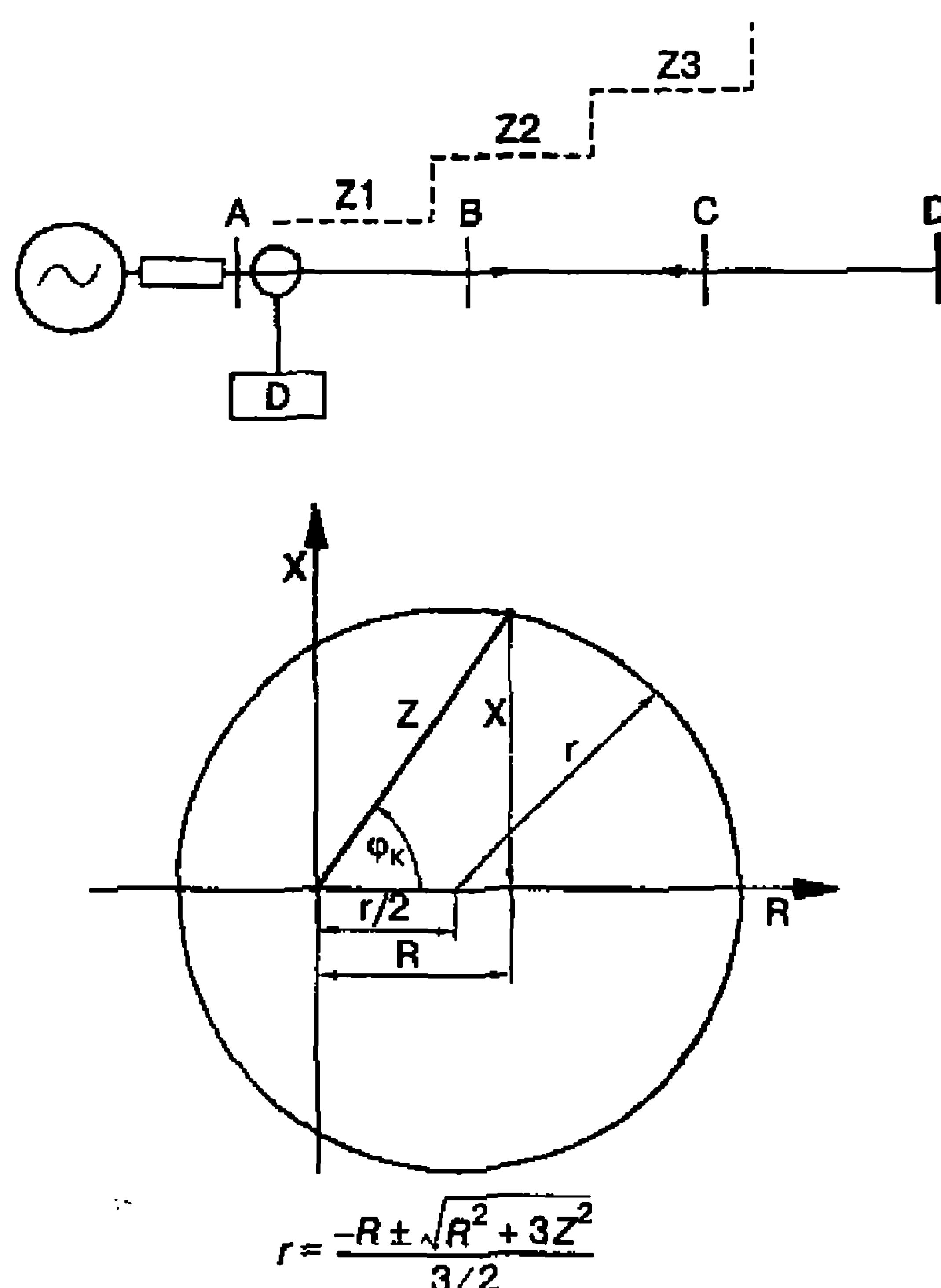


Рис. 3.23. Представление защищаемых зон на диаграмме полных сопротивлений (круговые характеристики традиционных реле, четырехугольные характеристики цифровых реле)



$$r = \frac{-R \pm \sqrt{R^2 + 3Z^2}}{3/2}$$

Рис. 3.24. Круговая характеристика со смещением

Если углы сопротивлений последовательно включённых линий не равны, например, при соединении воздушной линии с кабелем, расчёт становится громоздким и выполняется графическим способом.

В настоящее время иногда применяются компьютерные программы. С другой стороны, четырёхугольные (многоугольные) характеристики имеют независимые уставки в R и X направлениях. Поэтому, становится возможной достаточная компенсация сопротивления дуги при любой длине линии.

Уставка в X-направлении (защищаемая *зона) многоугольной характеристики равна* значению X в точке соответствующего пересечения ($x_2 = X_{ll} = Z_{ll}\sin\varphi_{ll}$). В этом случае нет необходимости изображать сопротивление линии, т.к. значение X может быть легко определено для конкретной длины линии. Поэтому, например, $x_2 = X_{A\text{-}B} + 0{,}5X_{B\text{-}C}$.

Аналогичным образом может быть рассчитана уставка R суммированием сопротивлений линий с учетом сопротивления дуги $R_2 = R_{A\text{-}B} + 0{,}5R_{B\text{-}C} + R_{\text{дуги }2}$.

Таким образом, расчёт уставок цифровых защит с многоугольными характеристиками (7SA5 и 7SA6) значительно упрощён. К тому же, возможна значительно более гибкая адаптация к системным режимам.

Полные дистанционные реле обычно содержат следующие зоны (рис. 3.25):

○ Пусковая зона (Z_A):

Только в случае пуска по сопротивлению эта зона будет иметь определённую характеристику на диаграмме сопротивлений. При использовании комбинированного пуска она изображается на *U*/*I* диаграмме.

Пусковая ступень не требуется, если каждая зона управляется независимо (см. ниже). Вместо нее может быть использована 4-ая ступень для ненаправленного резервирования (7SA522).

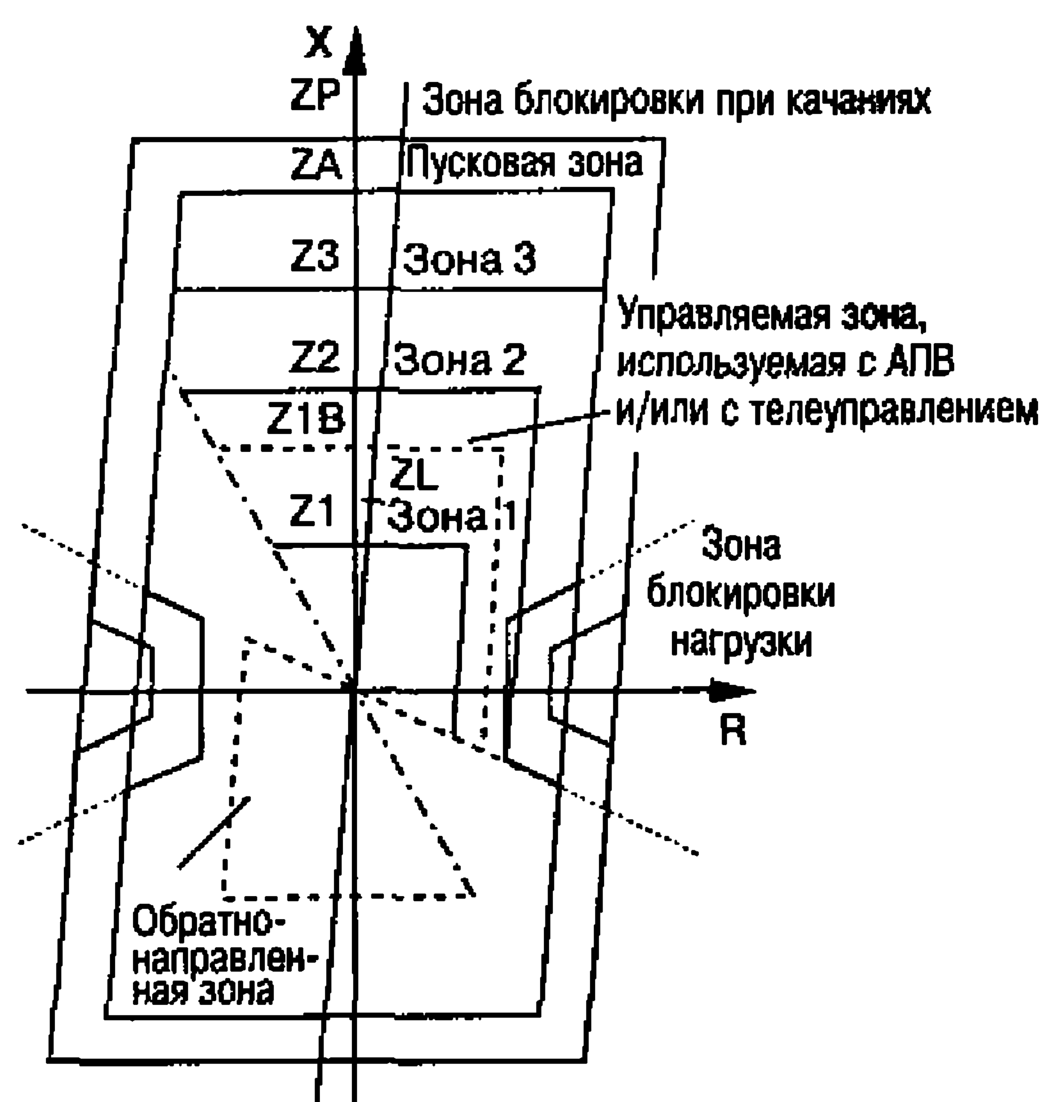


Рис. 3.25. Зоны (ступени) цифровой дистанционной защиты

○ Зоны трех ступеней защиты (Z_1, Z_2, Z_3)

Сюда включается одна ступень без выдержки времени с неполным охватом защищаемой зоны и две ступени с выдержками времени и полным охватом защищаемой зоны. Все эти ступени являются направленными и обычно имеют уставки только в прямом направлении.

Во многих случаях и, в частности, при наличии защиты от отказа выключателя, используются только три ступени (практика США). При этом первая (Z_1, $t_1 = 0$) и вторая (Z_2, t_2) ступени аналогичны упомянутым выше, а третья ступень (Z_3, t_3) выполняется ненаправленной.

В Европе, где защита от отказа выключателя обычно не применялась, три ступени выполнялись с уставками только в прямом направлении. А пусковая ступень совместно с характеристикой направленности использовалась для направленного и ненаправленного дальнего резервирования (с большой выдержкой времени).

Подобная практика часто используется и при наличии интегрированной в цифровые терминалы функции УРОВ.

Цифровые реле позволяют выбрать направленность действия каждой ступени независимо. Это удобно, например, при установке защиты на шиносоединительном выключателе или трансформаторе. В традиционных реле такая возможность была предусмотрена только в защитах объектов высокого класса напряжения (например, 7SL24) и только для одной из ступеней.

○ Управляемая зона с полным охватом (Z_{1B})

Она предназначена для использования в схеме защиты с передачей разрешающих сигналов телеуправления (см 3.1.10) или совместно с АПВ (см. 3.1.12)

○ Зона для блокировки защиты при качаниях (Zp)

Эта зона располагается вокруг пусковой зоны таким образом, что между ними существует интервал ΔZ.

Принцип действия блокировки рассмотрен в 3.1.11.

○ Направленная ступень с пусковым дистанционным реле сопротивления и временем срабатывания, большим уставок ступеней защиты

Функция пуска в сочетании с характеристикой направления обеспечивают направленную резервную ступень защиты, действующую в прямом направлении. Она используется в качестве резервной ступени защиты с выдержкой времени, следующей за 3 зоной защиты.

При использовании пуска по сопротивлению эта ступень имеет определенную ограниченную зону действия.

Если используется пуск по току, эта ступень соответствует максимальной токовой направленной защите, если используется комбинированный пуск, то ступень соответствует направленной максимальной токовой защите с пуском по напряжению.

○ Ненаправленная ступень с пусковым дистанционным реле и более длительной уставкой, чем уставки выдержек времени ступеней

Это так называемая завершающая резервная ступень, действующая в случае, если ни одна из предыдущих ступеней не срабатывает. Пусковая зона соответствует зоне ненаправленной ступени дистанционной защиты с большой выдержкой времени или ненаправленной максимальной токовой защите с выдержкой времени и пуском по напряжению.

3.1.8. Управление зонами, выдержками времени

Функционирование ступеней (зон) дистанционной защиты должно контролироваться таймерами (органами выдержек времени ОВВ) зон и, возможно, координироваться разрешающими или блокирующими сигналами от защиты, расположенной на противоположном конце. В зависимости от того, сколько систем измерения используется для реализации защищаемых зон, возможны различные структурные схемы устройств защиты.

В основе программного обеспечения цифровых устройств защиты лежат основные принципы, используемые в традиционной технологии.

Управление зонами и таймерами с помощью пусковых органов, определяющих замыкания

Такое управление предпочитают Европейские производители. Это было необходимо при использовании традиционной технологии, когда защита имела одну систему измерений для однофазных замыканий или одну для многофазных. При этом

переход от одной ступени к следующей, имеющей большую зону срабатывания, осуществлялся с помощью таймеров. Пусковой орган, выявляющий замыкания, в этом случае также управляет таймерами. Это означает, что зональные таймеры (ОВВ ступеней защиты) одновременно запускались и останавливались пусковым органом. Кроме того, было возможно внешнее управление переключением зон сигналом от внешнего устройства АПВ или сигналом от защиты противоположного конца линии.

Отключающий сигнал, возникающий при срабатывании любой из ступеней защиты, должен существовать до тех пор, пока не вернётся ПО (т. е. пока не будет отключено КЗ), несмотря на то, что измеряемое сопротивление может «выйти» из защищаемой зоны ещё до отключения КЗ.

Такая логика отключения имела свои преимущества при выполнении реле на статической элементной базе: цепь отключения формировалась только при независимом срабатывании ПО и измерительного органа (по схеме «И»). Это устраняло возможность ложного срабатывания при неисправности элементов. Функция дополнительной фазной селективности в защите с переключением входных величин подробно рассмотрена в следующей главе.

Рассмотренные принципы управления применяются и в цифровых реле 7SA510/11 и 7SA513, но есть отличие, заключающееся в том, что все зоны доступны одновременно и нет необходимости переключения по критериям, описанным выше, необходима только возможность разрешения или блокирования. Поэтому, например, управление быстродействующей (без выдержки времени) ступенью с неполным охватом и ступенью с полным охватом зоны в схеме защиты с разрешающими сигналами происходит одновременно и независимо. Итоговая структурная схема приведена на рис. 3.26.

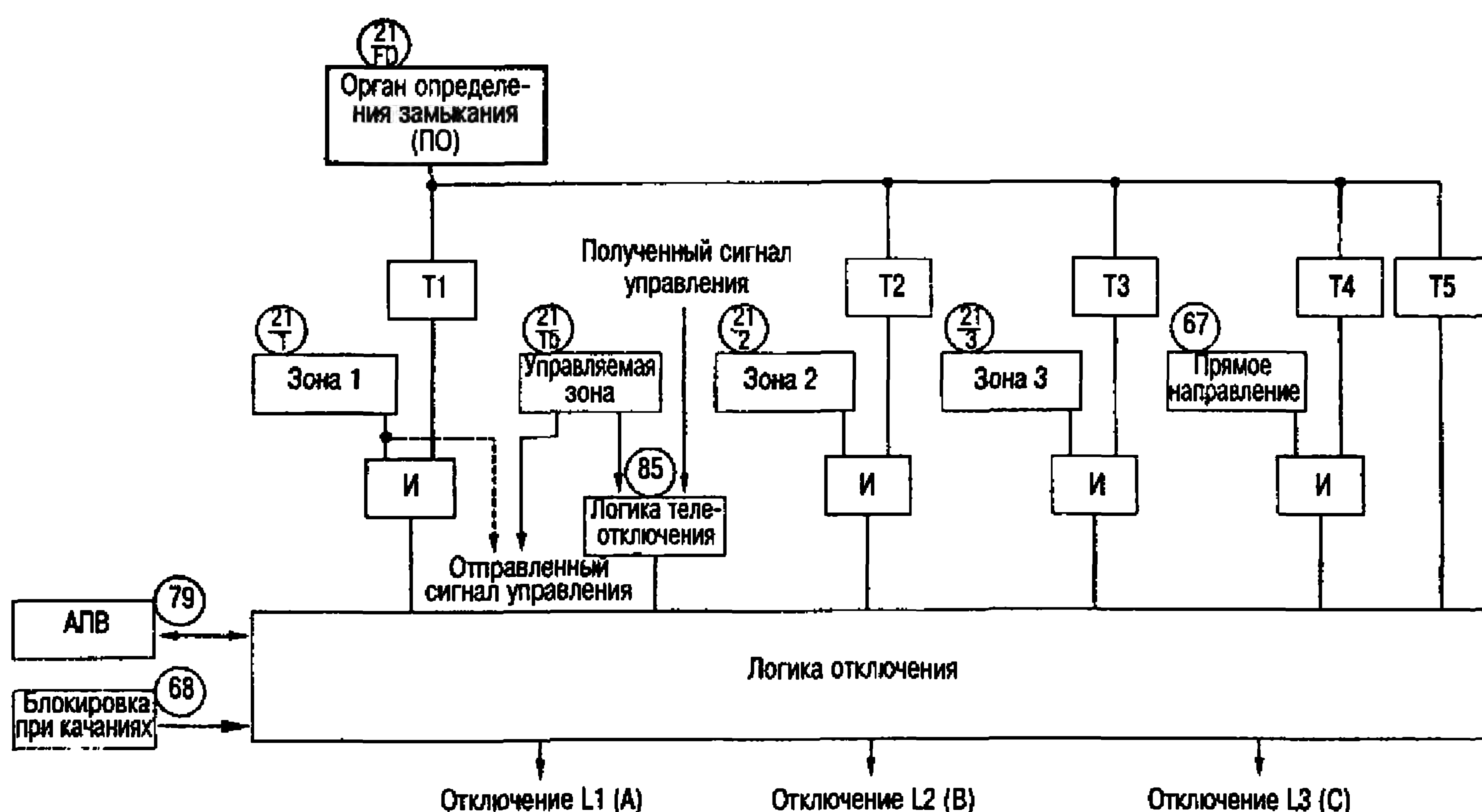


Рис. 3.26. Управление выдержками времени ступеней с помощью пускового органа 7SA511, 7SA513

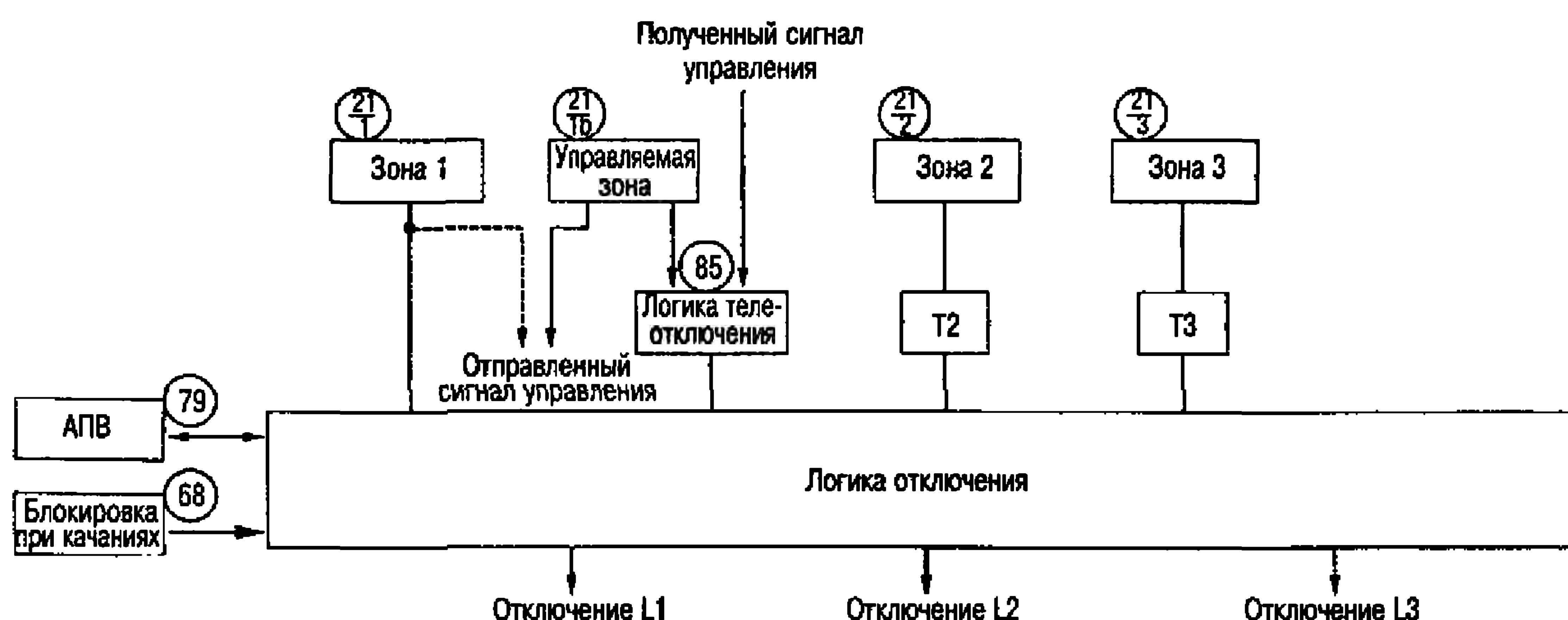


Рис. 3.27. Структурная схема «зонно-зависимой» логики (7SA522 и 7SA6)

«Зонно-зависимая» логика

Эта технология применялась в традиционных защитах в Англо-Саксонских странах. В этом случае, для каждой зоны была предусмотрена своя многофазная измерительная система. Пусковой орган, определяющий замыкание, описанный выше, не используется. Каждая ступень имеет свои органы выдержки времени и отключающие реле. Эта логика имеет то преимущество, что в случае отказа одной ступени, все остальные осуществляют независимое резервирование. Эта концепция идеальна для применения в защите на электромеханической элементной базе, где есть тенденция к отказу срабатывания. В случае применения этой логики для аналогово-статической элементной базы, параллельное соединение большого числа независимых измерительных систем могло бы привести к излишним срабатываниям. При использовании цифровой технологии эта проблема решена функцией самодиагностики.

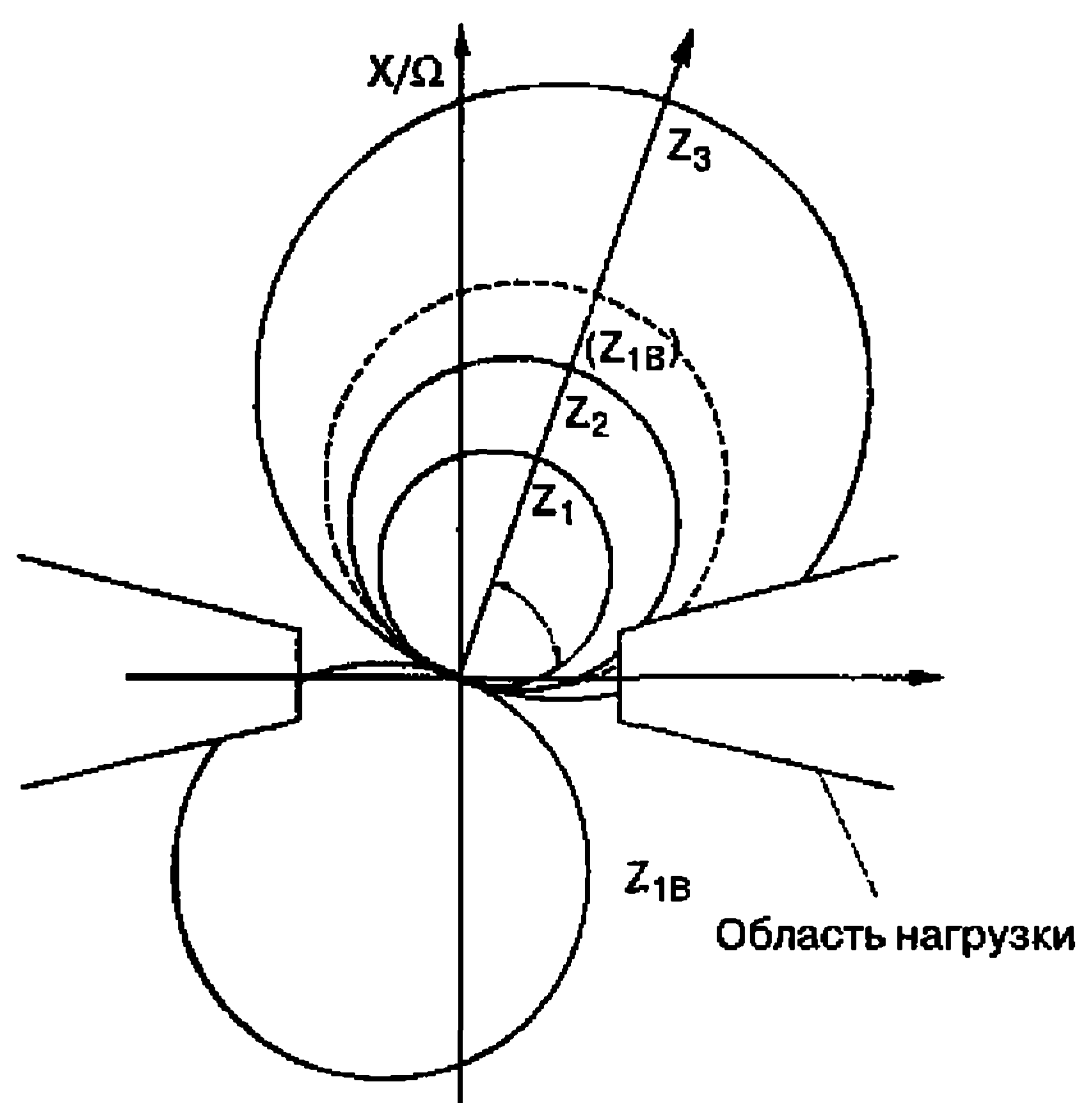


Рис. 3.28. Круговые характеристики срабатывания реле 7SA522

Структурная схема этой «зонно-зависимой» логики представлена на рис. 3.27. Цифровое реле 7SA522 спроектировано в соответствии с этой схемой. Характеристика срабатывания может быть многоугольной или круговой. Ступени не зависят друг от друга и имеют собственные выдержки времени. Но они имеют общую зону блокирования нагрузки, а также зону блокировки при качаниях, которая автоматически располагается вокруг самой большой зоны (рис. 3.28). Пусковая зона (определения повреждения) в этом реле отсутствует.

3.1.9. Дистанционная защита с переключением и без переключения входных величин

Дистанционные защиты с переключением входных величин в традиционных реле имеют только одну измерительную систему (измерительный орган) для определения направления или расстояния. Измеряемые величины, ток и напряжение, выбираются в соответствии с видом замыкания и подключаются к измерительной цепи. На рис. 3.29 представлена схема выбора электрических величин в электромеханических реле дистанционной защиты (только для определения расстояния).

Переключаемые реле управляются токовыми пусковыми органами I_L>>, установленными в каждой фазе. Использование шунтов ($R_ш$) снижает вторичные токи и предотвращает разрыв вторичных обмоток трансформаторов тока при переключениях. В полупроводниковых аналоговых статических защитах вместо контактов для переключения входных величин используются транзисторы.

Реле этого типа (электромеханические: R1KZ4, R1Z23, статические: 7SL7, 7SL24) называют «дистанционными реле

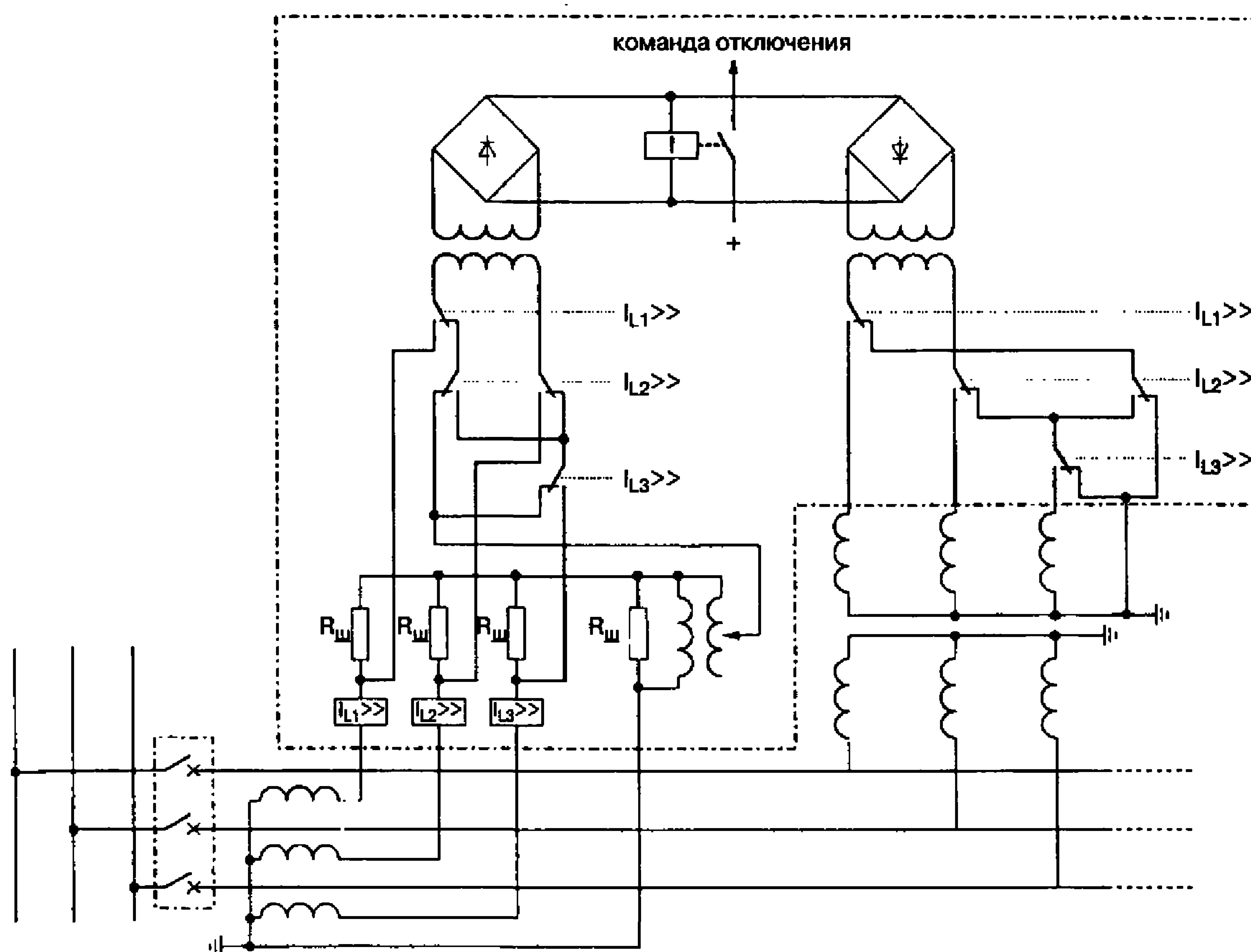


Рис. 3.29. Схема односистемного электромеханического реле с переключением входных величин

с логикой выбора» или дистанционными реле с переключением входных величин (в отечественной практике такие реле называют односистемными). Эти реле широко применяются на линиях среднего и высокого напряжения (рис. 3.30 и 3.31).

Поскольку выбор измеряемых величин и подключение их к измерительной системе происходит только после срабатывания пусковых элементов, начало дистанционных измерений всегда происходит с задержкой. Кроме того, должна быть введена ещё одна задержка (измерение двух полупериодов) для предотвращения неправильной работы в переходном режиме. Время срабатывания электромеханических реле составляет 40—60 мс, статических — не менее 25 мс.

Аналогично для цифровой защиты обозначение «односистемная дистанционная защита» означает то, что рассчитывается сопротивление одного контура, выбираемого пусковым органом.

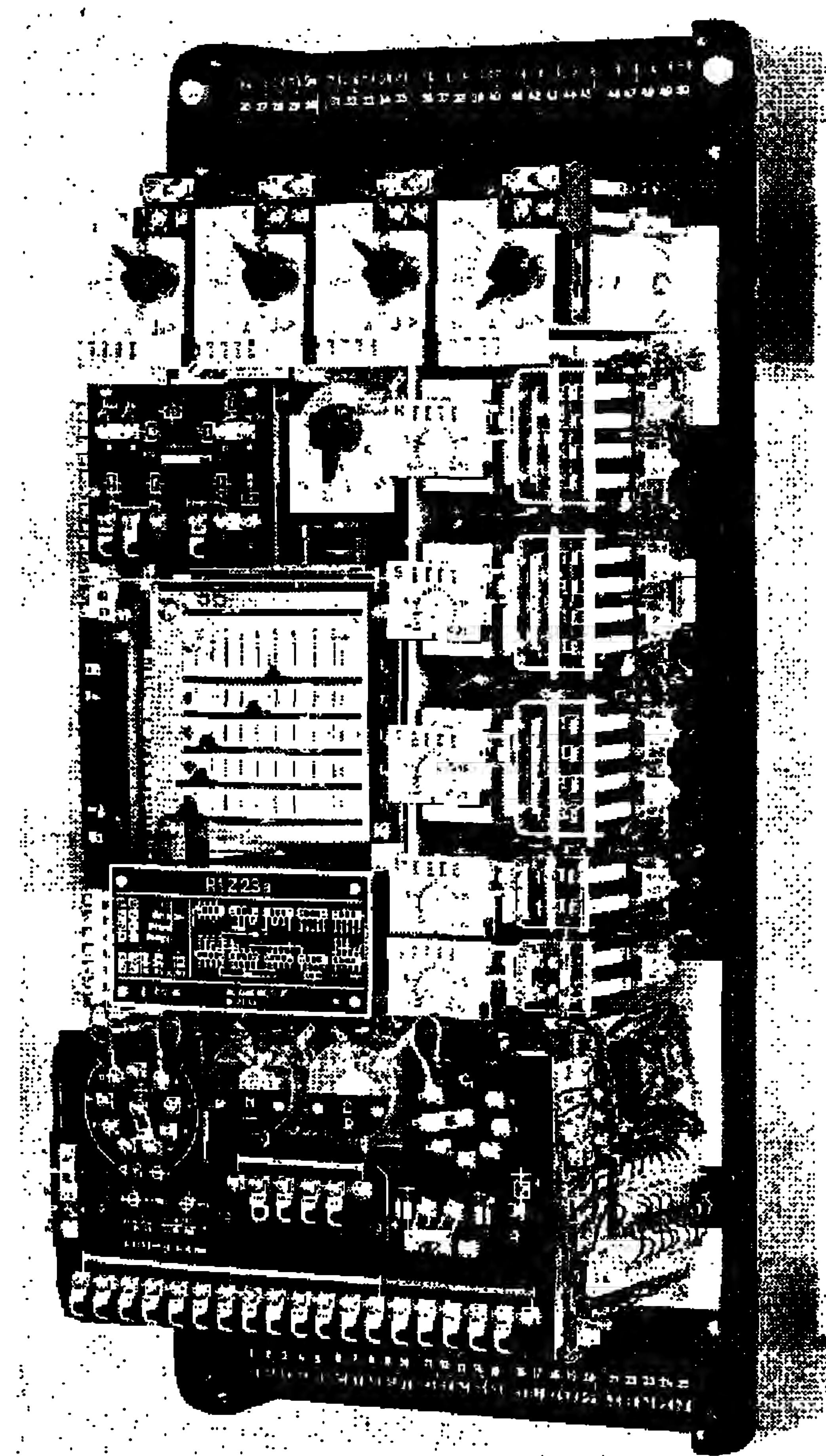


Рис. 3.30. Электромеханическая дистанционная защита высоковольтных систем: 7SL93 (R1Z23) без передней части корпуса

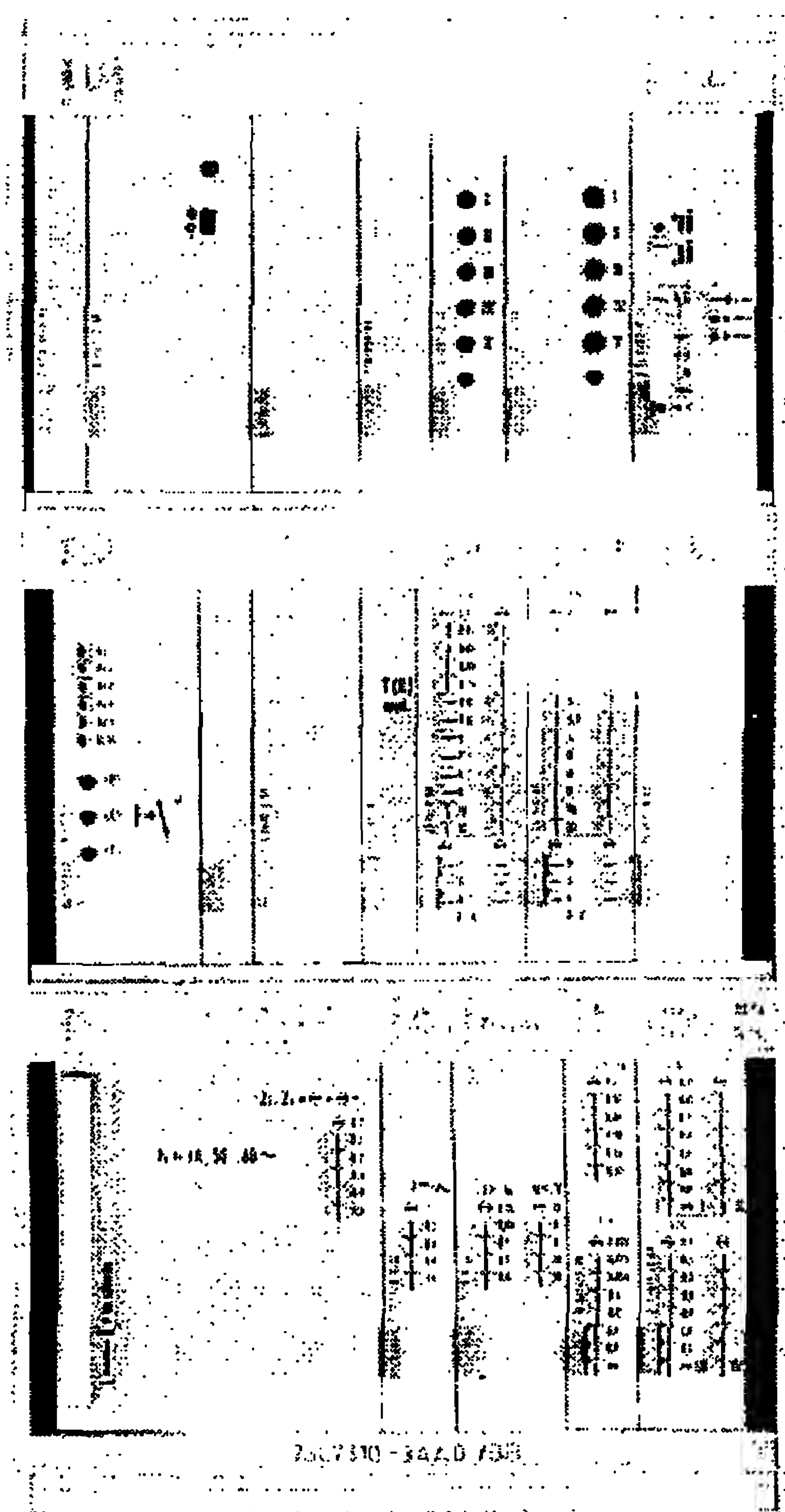


Рис. 3.31. Аналогово-статическая дистанционная защита для высоковольтных систем 7SL73, вид спереди

Однако, цифровые реле имеют существенное от аналоговых отличие, заключающиеся в том, что:

- Измерения всех петель производятся постоянно и результаты хранятся в памяти. Измеряемые значения всегда доступны и нет необходимости выбирать их путём переключений (реле без переключения входных величин)
- Повторные измерения больше не входят в цикл и могут производиться в более короткое время
- В результате времена срабатывания разных устройств мало различаются между собой (7SA511 — 25 мс, 7SA6 — 15 мс)

В сетях сверхвысокого напряжения (СВН) применяются электромеханические дистанционные реле с тремя системами измерений (трёхсистемное исполнение). Три измерительных системы нормально измеряют параметры трёх междуфазных контуров и переходят к измерению параметров трёх контуров фаза—земля при срабатывании ПО, фиксирующего появление тока в земле (нулевой последовательности). Так как измерительные системы жёстко связаны с фазами, то обеспечение фазной селективности не требуется.

Таким образом, достигается значительное сокращение времени срабатывания (с 60 до 25 мс).

Дополнительным достоинством трёхсистемного исполнения является то, что оно способно обнаружить и отключить два одновременно возникающих, но расположенных в разных местах, замыкания на землю. При односистемном исполнении эти замыкания могут быть отключены только последовательно.

В системе с изолированной/компенсированной нейтралью такое поведение нежелательно, так как в этом случае должно быть отключено только одно место замыкания. Оставшееся замыкание должно либо угаснуть, либо быть отключено вручную. Для этого, в каждом конкретном случае определяется фаза, отключение которой является более предпочтительным по сравнению с остальными (см. п.п. 5.2.2). Это означает, что в системах с изолированной/компенсированной нейтралью применение защит с несколькими измерительными системами нерационально. Поэтому в этих системах традиционно применяются дистанционные защиты с переключением входных величин. Однако, следует заметить, что в отдельных случаях защиты с несколькими измерительными системами (7SA513, 7SA6) применяются и в сетях с компенсированной нейтралью, тогда оба замыкания отключаются одновременно.

В защитах на аналогово-электронной элементной базе (7SL31/32) предусмотрено 6 измерительных систем, т.е. для каждого контура замыкания применяется своя измерительная система (L1-E, L2-E, L3-E, L1-L2, L2-L3, L3-L1).

Для цифровых защит это практически означает, что параметры всех шести возможных контуров замыкания одновременно вычисляются и оцениваются.

Реле этого типа называются «непереключаемыми».

В традиционной технологии создания реле использовался термин «полная дистанционная защита» или «полная схема». Он относился к дистанционной защите, которая имела для каждой зоны (ступени) и для каждого вида замыкания отдельную систему измерений, т.е., например, трёхступенчатая защита содержала 18 систем измерений (измерительных органов сопротивления).

Поэтому ступени с полным и неполным

охватом зоны могли работать одновременно и параллельно. Например, независимые ступени с неполным и полным охватом зоны для защиты с каналами связи были доступны одновременно.

В цифровых защитах это преимущество достигается значительно меньшими усилиями. В цифровых реле вычисляется одно сопротивление замыкания и его положение относительно зон защиты определяется простым сравнением полученного значения с порогами (уставками).

3.1.10. Дистанционная защита с каналами связи

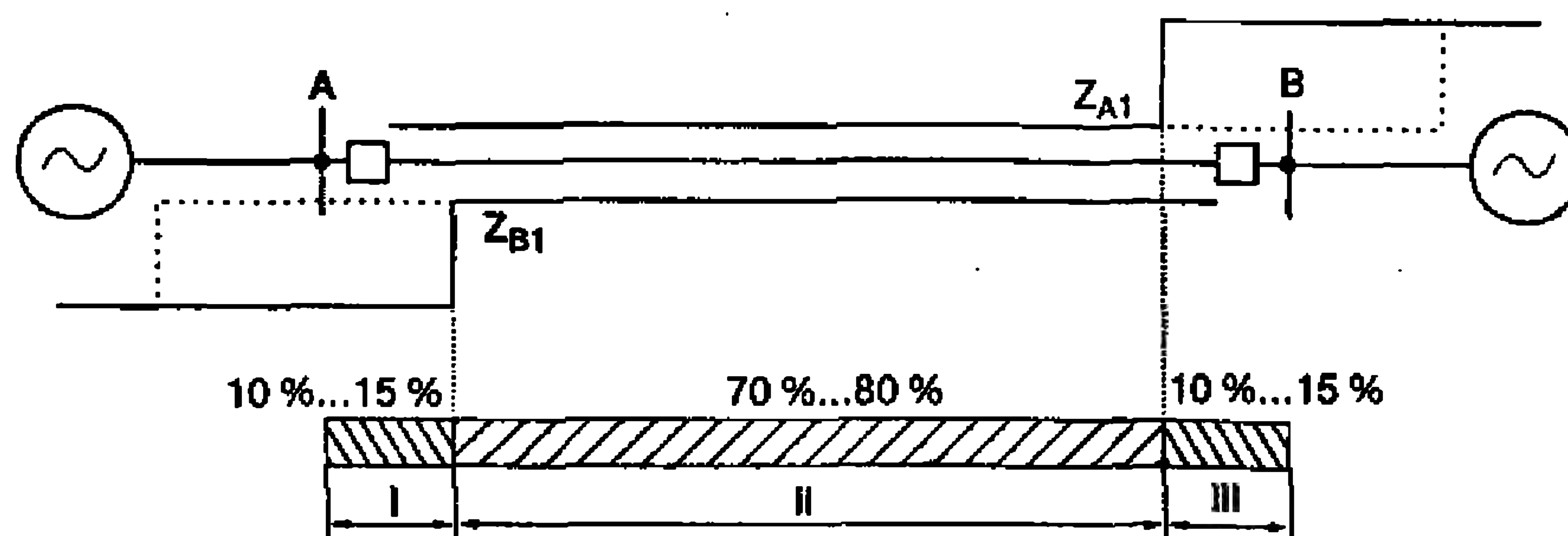
Быстродействие — крайне важное требование к защитам, устанавливаемым на передающих и распределительных линиях электропередачи. В зону срабатывания ступеней без выдержки времени дистанционных защит попадает лишь 70—80 % длины линии (рис. 3.32) [3.5, 3.6]. При использовании каналов связи для передачи информации между концами линии может быть создана быстродействующая селективная система телезащиты линии электропередачи от всех видов коротких замыканий (рис. 3.33).

В такой системе полукомплекты защиты должны передавать на другой конец либо блокирующий, либо разрешающий сигнал в зависимости от того, какая схема телезащиты — блокирующая или разрешающая применяется. В любом случае должны передаваться только простые сигналы ДА/НЕТ.

В традиционных схемах телезащиты использовались высококачественные каналы связи. Однако наиболее современной на сегодняшний день является передача цифровых сигналов по выделенным оптоволоконным каналам и сетям передачи данных.

Используются следующие каналы связи:

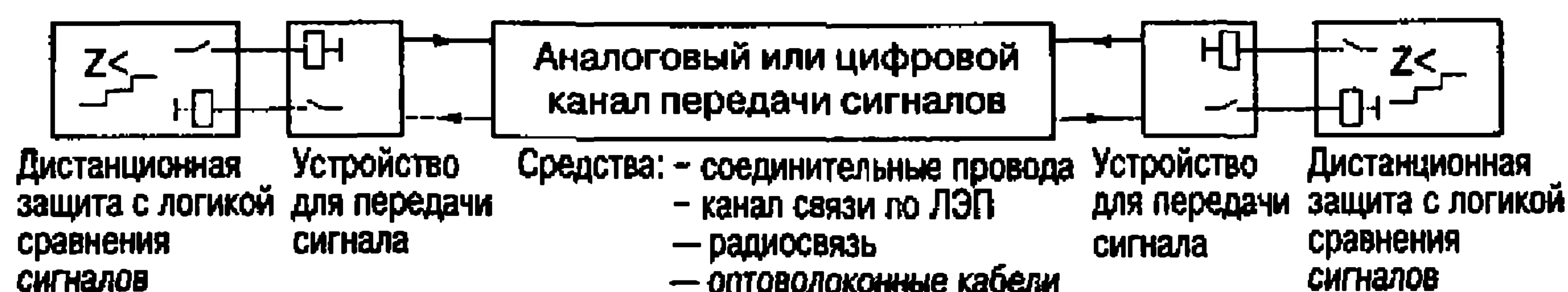
- контрольные провода (специальные сигнальные кабели с защитными экранами и изоляцией от наведённых напряжений) длиной до 25 км;
- каналы ВЧ связи по ЛЭП длиной до 400 км;



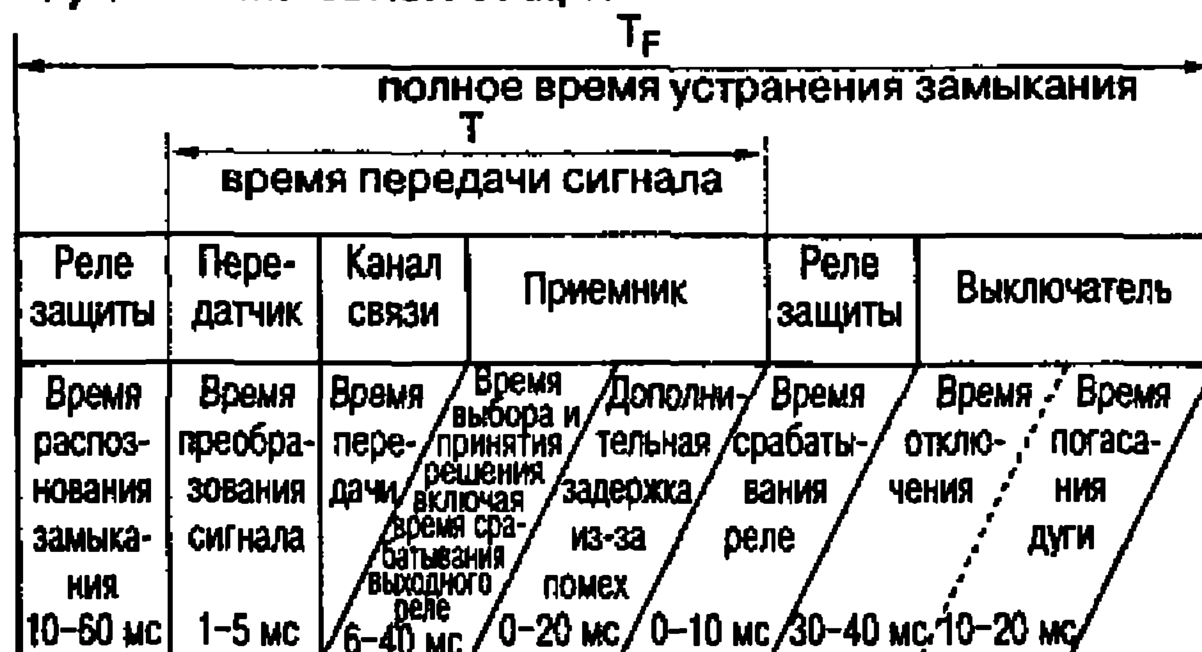
Замыкание в зоне II: Быстрое отключение на обоих концах линии ступенями с неполным охватом

Замыкание в зоне I или III: Задержка отключения на время t_2 (ступень 2) на удаленном конце линии Для быстрого отключения необходима информация с удаленного конца линии

Рис. 3.32. Двухступенчатая дистанционная защита



а) система связи защит



б) составляющие времени отключения повреждения

Рис. 3.33. Дистанционная защита с передачей данных; составляющие времени отключения повреждения

- радиоканалы, обеспечивающие передачу сигналов на расстояния до 50 км (в пределах прямой видимости); если расстояние больше, то связь осуществляется через ретрансляционные станции;
- оптоволоконные кабели — связь осуществляется напрямую, если расстояние не превышает приблизительно 150 км; если расстояние больше, то используются промежуточные усилители;
- цифровые сети передачи данных.

Время передачи сигнала звуковой частоты составляет приблизительно 15—20 мс. Хорошая помехоустойчивость обеспечивается использованием фазочастотной модуляции. При использовании высокочастотной связи по ЛЭП (с амплитудной модуляцией сигнала) время передачи сигнала сокращается приблизительно до 5 мс. И хотя в этом случае помехоустойчивость ниже, однако, этот способ используется для передачи блокирующих сигналов (особенно в США).

Использование оптоволоконных кабелей для цифровой передачи данных открывает новые возможности.

В этом случае помехи практически отсутствуют, а кодирование информации позволяет достичь чрезвычайно высокого уровня надёжности. При этом достигается очень высокая работоспособность и крайне короткое время передачи сигнала — ниже 5 мс.

Современные цифровые реле могут быть оснащены оптическими коммуникационными модулями для прямой связи между концами линии электропередачи длиной менее 50 км. Внешние коммуникационные устройства в этом случае не нужны.

При использовании специальных оптоволоконных коммуникационных устройств с лазерными диодами возможна передача данных на расстояние до 150 км без промежуточных повторителей.

На сегодняшний день большинство предприятий имеет в своем пользовании цифровые коммуникационные сети. Они могут быть использованы для целей защиты в TDM режиме (TDM — временное

мультиплексирование). При передаче сигнала через ряд подсетей, полное время передачи сигнала может увеличиться до 5 мс. В каждом случае необходимо четкое планирование и проверка надежности и безопасности передачи данных. Частота появления ошибочных битов в коммуникационных сетях (10^{-6}) значительно выше, чем при использовании оптоволокна (10^{-9}). Кроме того, в результате переключения каналов сети возможно изменение времени передачи сигнала и потеря данных о времени или синхронизации, что может вызвать замедление до одной секунды. Наилучшим решением является фиксированное соединение точка-точка с X.21 или G.703 совместимостью.

Можно выделить несколько способов использования сигналов телеуправления.

Разрешающий сигнал с противоположного конца линии

В этом случае ступень с неполным охватом зоны, обычно первая, напрямую воздействует на отключение выключателя своего конца и одновременно посылает сигнал на удалённый конец. Полученный сигнал с удалённого конца используется для быстрого отключения линии, если замыкание расположено вблизи противоположного конца, вне зоны действия ступени с неполным охватом. Таким образом, при использовании разрешающих сигналов обеспечивается быстрое отключение, не зависящее от времени передачи сигнала, приблизительно на 85 % длины защищаемого фидера. Однако, при использовании данной системы на двухцепных воздушных линиях необходимо учесть, что при КЗ на землю зона, защищаемая первой ступенью, может сократиться (см. 3.5.3).

Для воздействия на выключатель с удалённого конца возможны следующие способы:

Прямая передача отключающего сигнала от ступени с неполным охватом защищаемой зоны (DUTT)

В этом случае выключатель напрямую отключается полученным сигналом.

Такое прямое отключение без учёта работы защиты на принимающем конце используется только в исключительных случаях, т.к. получение ошибочного сигнала сразу же приведёт к неверному отключению выключателя.

Поэтому, использование данной системы допустимо, только если на противоположном конце отсутствует возможность подключения защиты к измерительным трансформаторам напряжения и тока.

Для достижения большей надёжности часто применяются два отдельных канала передачи данных. На принимающем конце сигналы подаются на вход элемента «И» (например, последовательное соединение принимающих контактов).

В качестве варианта может быть рассмотрено использование сигнала передачи данных с абсолютной надёжностью через оптоволоконные кабели с защищённым протоколом передачи (устройство для передачи данных для защиты SWT 2000 D).

Передача разрешающего сигнала от ступени с неполным охватом защищаемой зоны (PUTT) с применением пускового органа (определения замыкания)

Полученный сигнал отключает выключатель только в случае срабатывания пускового органа дистанционной защиты, т.е. при обнаружении КЗ (рис. 3.34).

При использовании данного способа для однофазного отключения, пусковые органы являются фазными селекторами, т.е. полученный сигнал при обнаружении однофазного повреждения вызывает отключение повреждённой фазы. При многофазных КЗ отключаются все 3 фазы.

Передача разрешающего сигнала от сту-

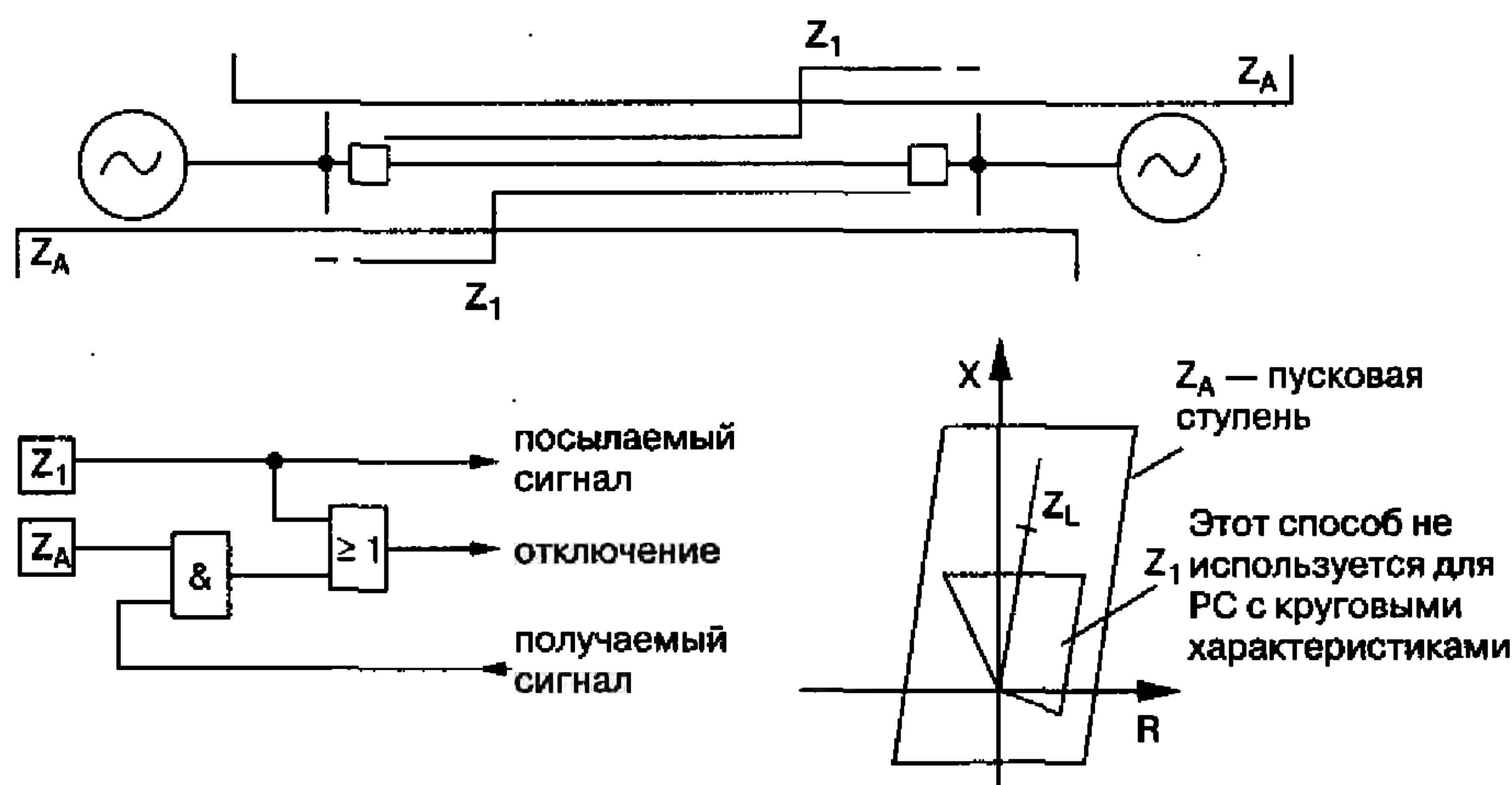


Рис. 3.34. Дистанционная защита с передачей разрешающего сигнала от ступени с неполным охватом зоны (PUTT) и использованием ПО

пени с неполным охватом защищаемой зоны (PUTT) с расширением зоны защиты противоположного конца (ускорение второй ступени защиты при получении разрешающего сигнала).

В этом случае полученный сигнал разрешает ступени с полным охватом защищаемой зоны сработать без замедления и отключить выключатель (рис. 3.35). В традиционных защитах это осуществлялось переключением от первой зоны к зоне с полным охватом, т. е., собственно, от первой ступени защиты ко второй или третьей. В цифровых просто разрешается срабатывание ступени с полным охватом защищаемой зоны. Остальные ступени, имеющие выдержки времени, продолжают независимо работать (см. п.п. 3.1.9).

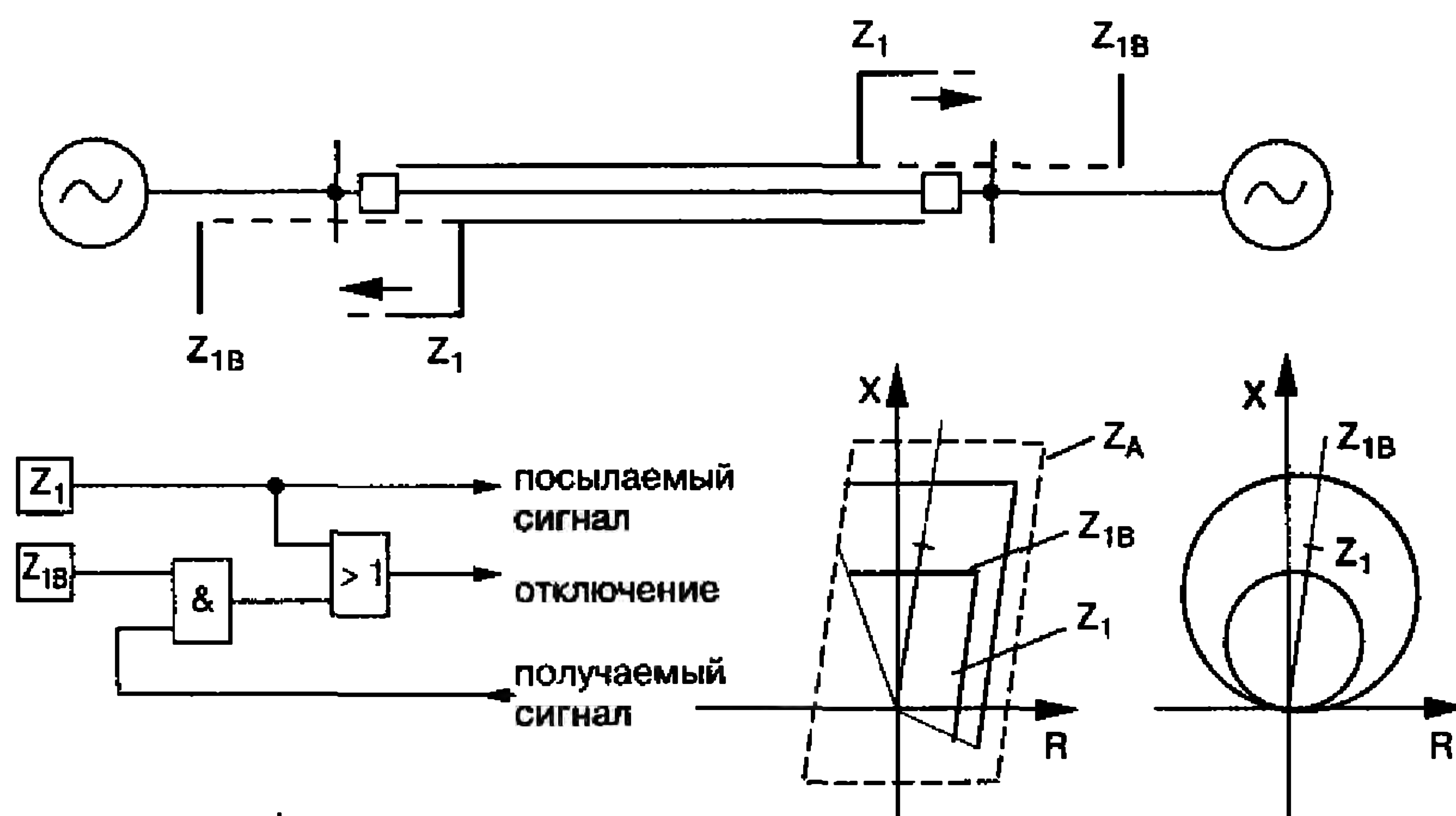


Рис. 3.35. Дистанционная защита с каналом связи для передачи разрешающего сигнала (PUTT) с расширением зоны действия защиты принимающего конца

Использование разрешающих сигналов (PUTT) в сочетании со ступенью с полным охватом зоны обеспечивает большую селективность, чем PUTT с применением пусковых органов.

Отключение разрешается только в случае внутренних замыканий, т. е. при КЗ в пределах длины защищаемого фидера. Поскольку пусковые органы могут срабатывать и в случае удалённых замыканий в системе, то в этом случае, вероятность излишнего отключения при получении ложного сигнала несколько выше.

Недостатком данного способа при применении его в традиционных реле было то, что после переключения с первой ступени на ступень с полным охватом зоны производились новые измерения, что приводило к дополнительной задержке срабатывания порядка десятков миллисекунд. В цифровых реле данной проблемы не существует, т. к. все измерения всех ступеней производятся одновременно.

Поэтому именно данный способ использован в реле 7SA511, 7SA513 или 7SA522.

Передача разрешающего сигнала от ступени с полным охватом защищаемой зоны (POTT)

В этом случае полученный сигнал разрешает срабатывание ступени с полным охватом.

Дистанционная защита с передачей разрешающего сигнала от ступени с полным охватом зоны (POTT)

При использовании данного метода достигается быстрое отключение, если ступени реле с полным охватом защищаемого фидера на обоих концах линии обнаруживают короткое замыкание и посылают друг другу разрешающий сигнал (рис. 3.36). Этот метод рекомендуется для защиты коротких фидеров, особенно если воздушная линия или кабель являются настолько короткими, что ступень с неполным охватом не может быть использована из-за слишком маленькой уставки.

В случае использования традиционных реле с круговыми характеристиками, появляется ещё один недостаток, заклю-

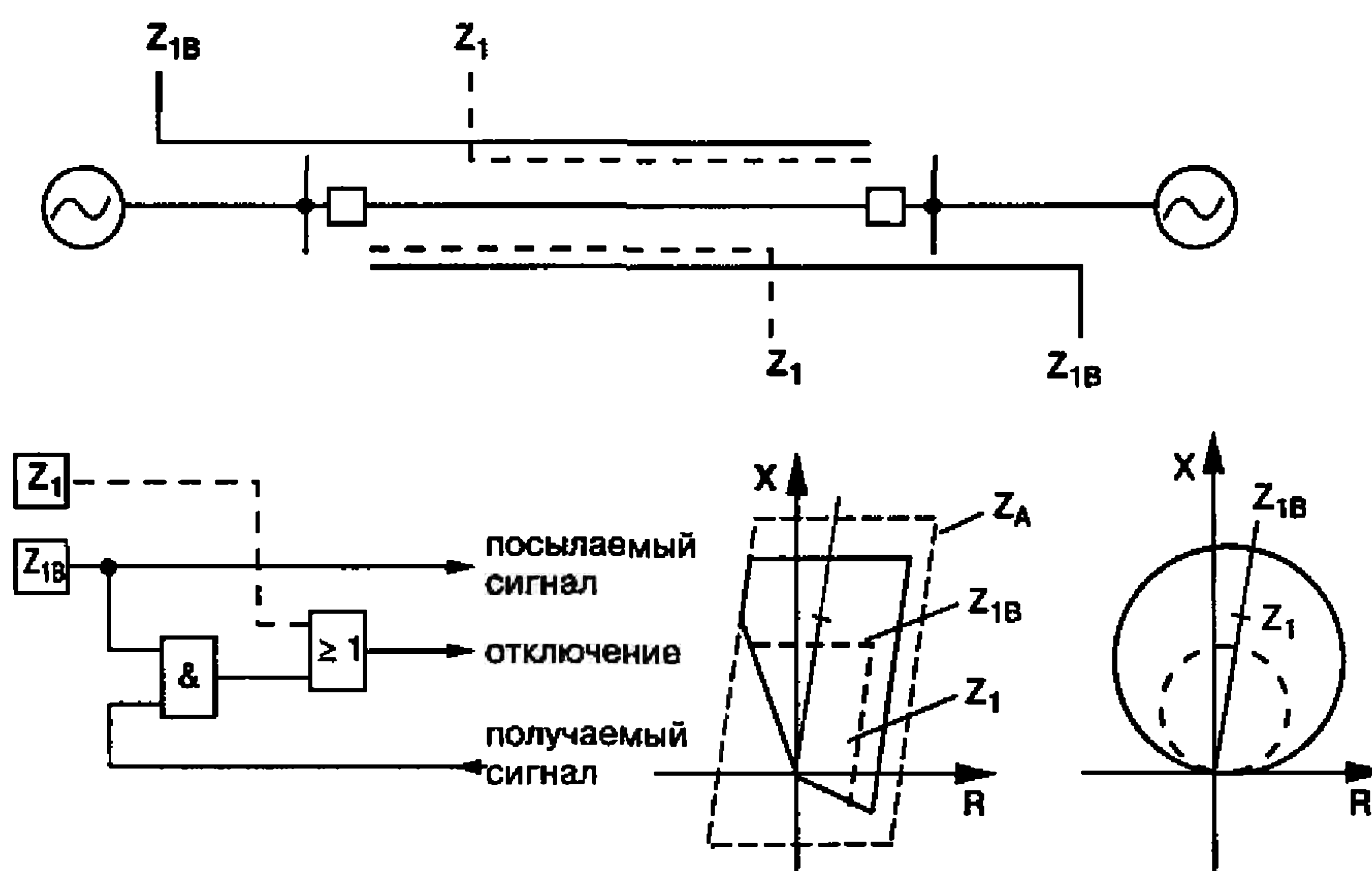


Рис. 3.36. Дистанционная защита с передачей разрешающий сигналов, POTT

чающийся в слабой компенсации сопротивления дуги при малых уставках.

По этой причине данный метод применяется на фидерах, длина которых не более 20 км, даже если использование ступени с неполным охватом допустимо.

В случае цифровых реле с многоугольными характеристиками срабатывания эта проблема решена и передача разрешающего сигнала для ступени с полным охватом зоны применяется только на очень коротких воздушных линиях и кабелях.

Особой причиной для применения данного метода может являться необходимость быстрого отключения кабеля со слабой подпиткой на одном конце. Тогда на этом конце должна быть предусмотрена специальная «эхо-цепь» (рис. 3.37).

При замыкании за источником со слабой подпиткой ток короткого замыкания будет протекать по защищаемому фидеру к месту короткого замыкания. Защита на конце со слабой подпиткой пускается и, обнаружив замыкание в обратном направлении, не посылает разрешающего сигнала на конец с сильной подпиткой.

С другой стороны, при внутренних КЗ защита на «слабом» конце не сработает из-за недостаточной чувствительности по току. Сигнал, полученный защитой на слабом конце, вернётся как отражённый и разрешит отключение выключателя на конце с сильной подпиткой.

Одновременно с подачей отражённого сигнала защита может отключить свой выключатель. Это обеспечивается вводом на конце со «слабым» питанием функции, логическая схема которой изображена на рис. 3.37. Выполнение условий отключения и фазной селективности контролируется органом минимального напряжения.

При использовании дистанционной защиты с передачей разрешающего сигнала для ступени с полным охватом, необходима некоторая координация работы защиты и канала передачи сигнала для предотвращения «гонок» при коммутациях в системе и изменении вида замыкания.

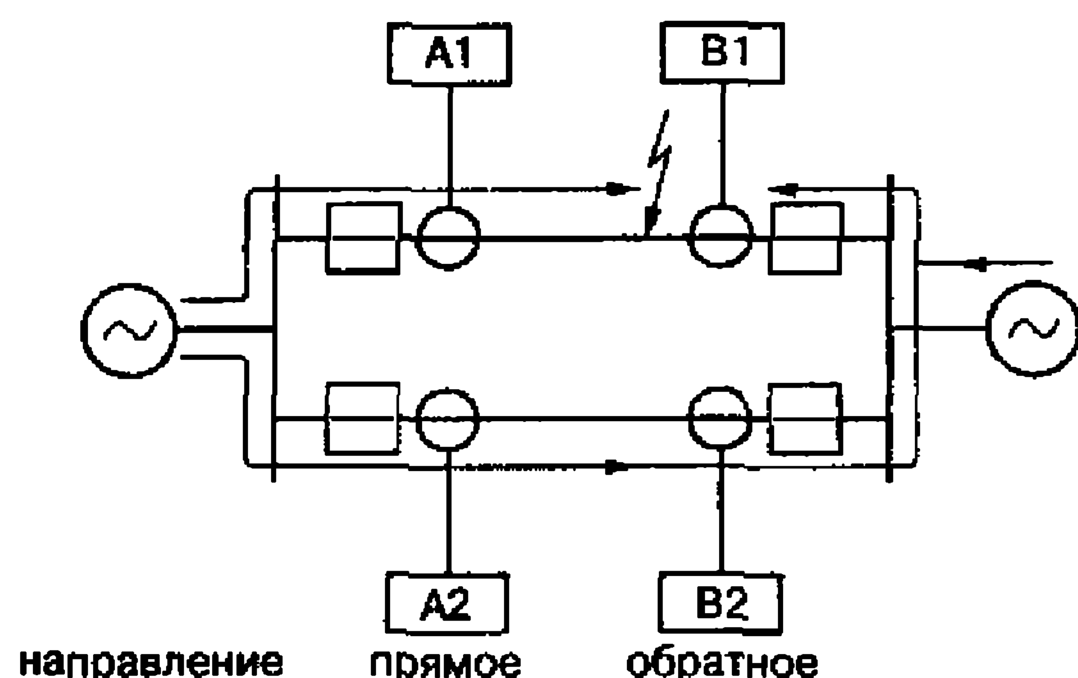
На рис. 3.38 представлен типичный пример того, что может произойти при устранении внешнего короткого замыкания:

При замыкании ток КЗ потечёт по здоровому фидеру от точки А к В, т. к. замыкание произошло вблизи точки В. Состояние сигналов в системе представлено на рис. 3.38, *а*.

Рис. 3.37. Дополнительные функции защиты с POTT

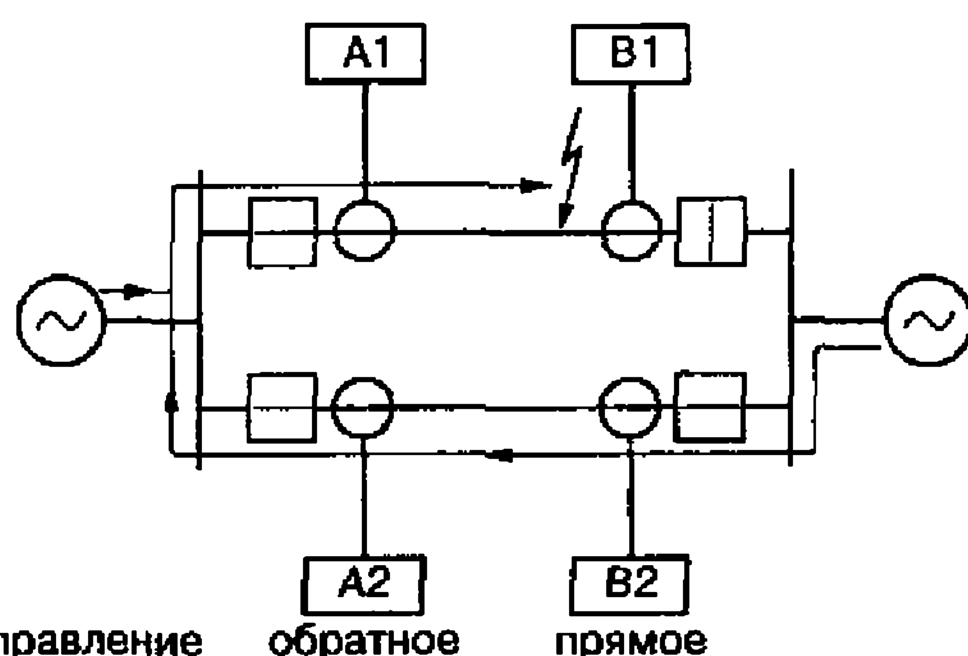
Если защита или выключатель на повреждённом фидере в точке В сработает быстрее, чем в точке А, то направление тока в неповреждённом фидере изменится на противоположное, чем будет вызвана смена сигналов защит, которая представлена на рис. 3.38, *б*.

Возникают «гонки». Это может привести к ложному отключению, если, например, защита в точке В уже переключилась на прямое направление, тогда как полученный сигнал в точке В до сих пор существует. Такой последовательности событий можно ожидать из-за неизбежного за-



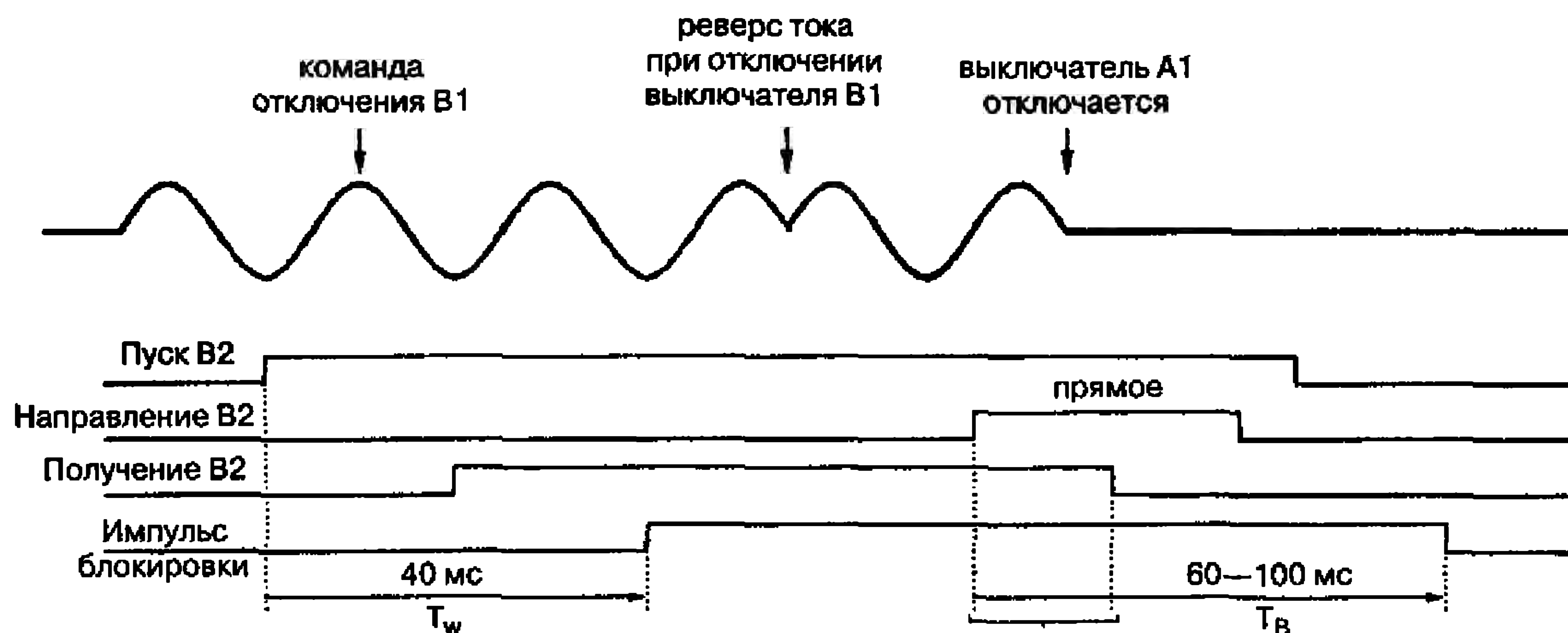
направление	прямое	обратное
посылаемый сигнал	да	нет
получаемый сигнал	нет	да

а) состояние сигналов в защитах А2 и В2 после возникновения КЗ



направление	обратное	прямое
посылаемый сигнал	нет	да
получаемый сигнал	да	нет

б) состояние сигналов в защитах А2 и В2 после отключения выключателя на одном конце В1



в) временная диаграмма сигналов

Рис. 3.38. Распределение токов и сигналов в цепях защиты в процессе возникновения и отключения внешнего повреждения

медления при возврате защиты в точке A и в каналах связи.

По этой причине необходим дополнительный контроль, который определяет внешние замыкания и блокирует передачу разрешающего сигнала для ступени с полным охватом на короткое время, в течение которого может возникнуть обратный ток (рис. 3.38, в).

Логическая схема представлена на рис. 3.39. Время ожидания T_W (около 20 мс) учитывает задержку при передаче сигнала с удаленного конца и гарантирует то, что блокировка не будет запущена при возникновении внутреннего короткого замыкания. Однако оно не должно быть больше времени отключения выключателя, чтобы блокирующий сигнал был отправлен до возможного изменения направления протекания мощности. Если одно из условий возникновения внешнего короткого замыкания существует больше времени T_W, то запускается время блокировки T_B. Оно должно выбираться с учетом времени отключения внешнего короткого замыкания и времени запаса (150 мс).

Передача разрешающего сигнала телеотключения по контрольному проводу для ступени с полным охватом

В сетях среднего напряжения, например, городских кабельных сетях, обычно применяется дистанционная защита (РОТТ) с передачей разрешающего сигнала по контрольному проводу (рис. 3.40).

Обмен сигналами между двумя концами линии осуществляется током, циркулирующим от аккумуляторов на одной из станций по контрольному проводу через принимающие реле на обеих станциях.

Состояние канала связи контролируется постоянным током, протекающим по нему (реле K2 на обоих концах находятся в сработанном состоянии).

При срабатывании пускового органа контур тока разрывается (реле K1 срабатывает, K2 возвращается). Контур остаётся разомкнутым при внешних замыканиях. При внутренних замыканиях после истечения выдержки времени T_{1B} управляемой ступени Z_{1B} с полным охватом зоны реле K1 на обоих концах возвращаются. Контур для протекания тока снова замкнётся. Реле K2 на обоих концах линии снова сработают и будет разрешена передача сигнала на отключение.

Быстрое отключение также достигается и на линиях с односторонним питанием.

Способы блокировки

В этом случае передаваемый сигнал используется для блокировки действия защиты при внешних коротких замыканиях.

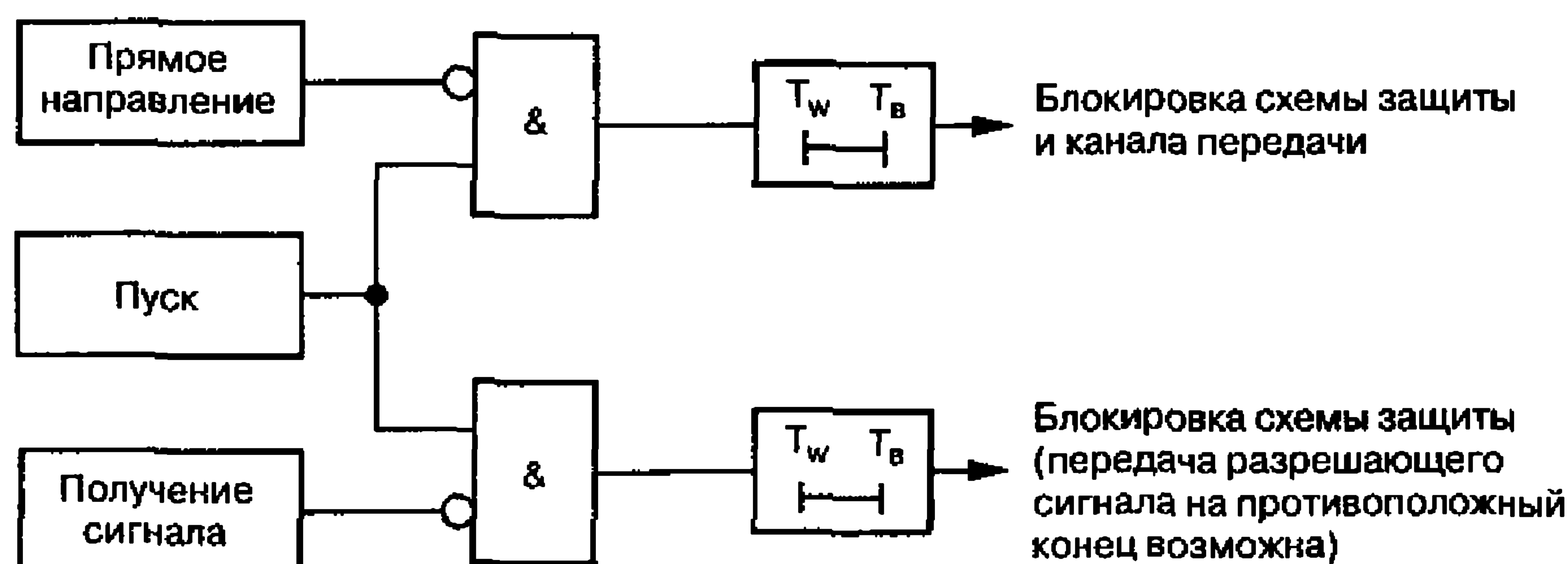


Рис. 3.39. Логическая схема для блокирования защиты с РОТТ при реверсе тока

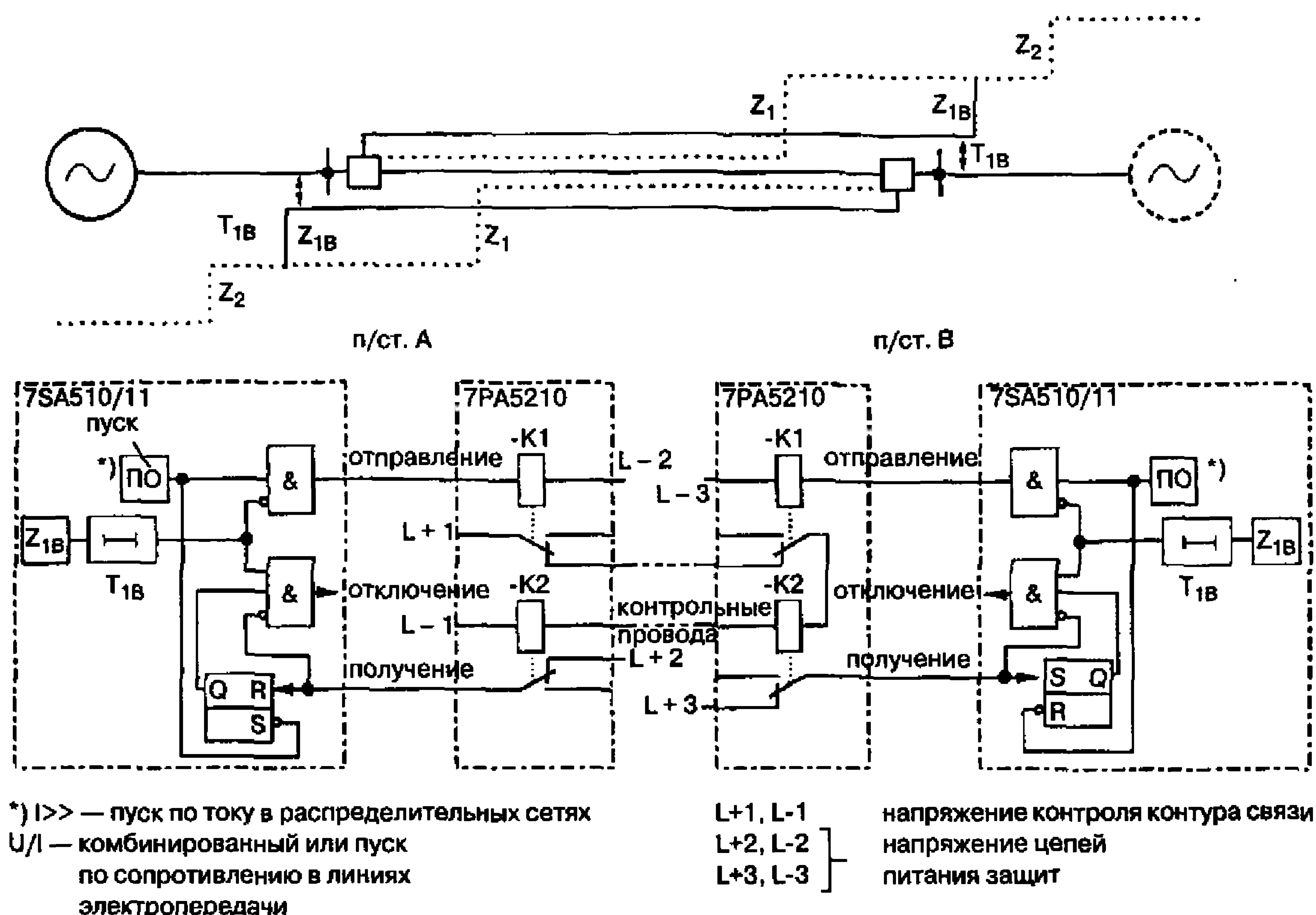


Рис. 3.40. Передача разрешающего сигнала с использованием проводной связи

Дистанционная защита с блокировкой (сравнение направлений с помощью блокирующих сигналов)

Здесь необходимы 2 ступени защиты:

1. Быстродействующая пусковая ступень, которая посылает блокирующий сигнал на удалённый конец, если замыкание находится вне защищаемой зоны, в обратном направлении.

2. Направленная ступень с полным охватом зоны в прямом направлении, которая запрещает блокирующий сигнал при замыканиях в прямом направлении и действует на отключение выключателя, если отсутствует блокирующий сигнал с удалённого конца.

На рис. 3.41 представлено классическое расположение зон для МНО реле (реле с круговыми характеристиками), а также соответствующая логика.

Зона действия в обратном направлении блокирующей ступени реле должна быть больше, чем зона действия отключающей ступени (реле) с полным охватом на противоположном конце.

Типичные уставки:

⇒ отключающей ступени: 130% Z_L

⇒ блокирующей ступени: 50% Z_L

В идеале блокирующий сигнал должен передаваться только в том случае, если замыкание находится вне защищаемой зоны в обратном направлении («за спиной у защиты»). При использовании традиционных реле блокирующая ступень имеет *смещение в прямом направлении*, т.е. охватывает начало защищаемой линии, что

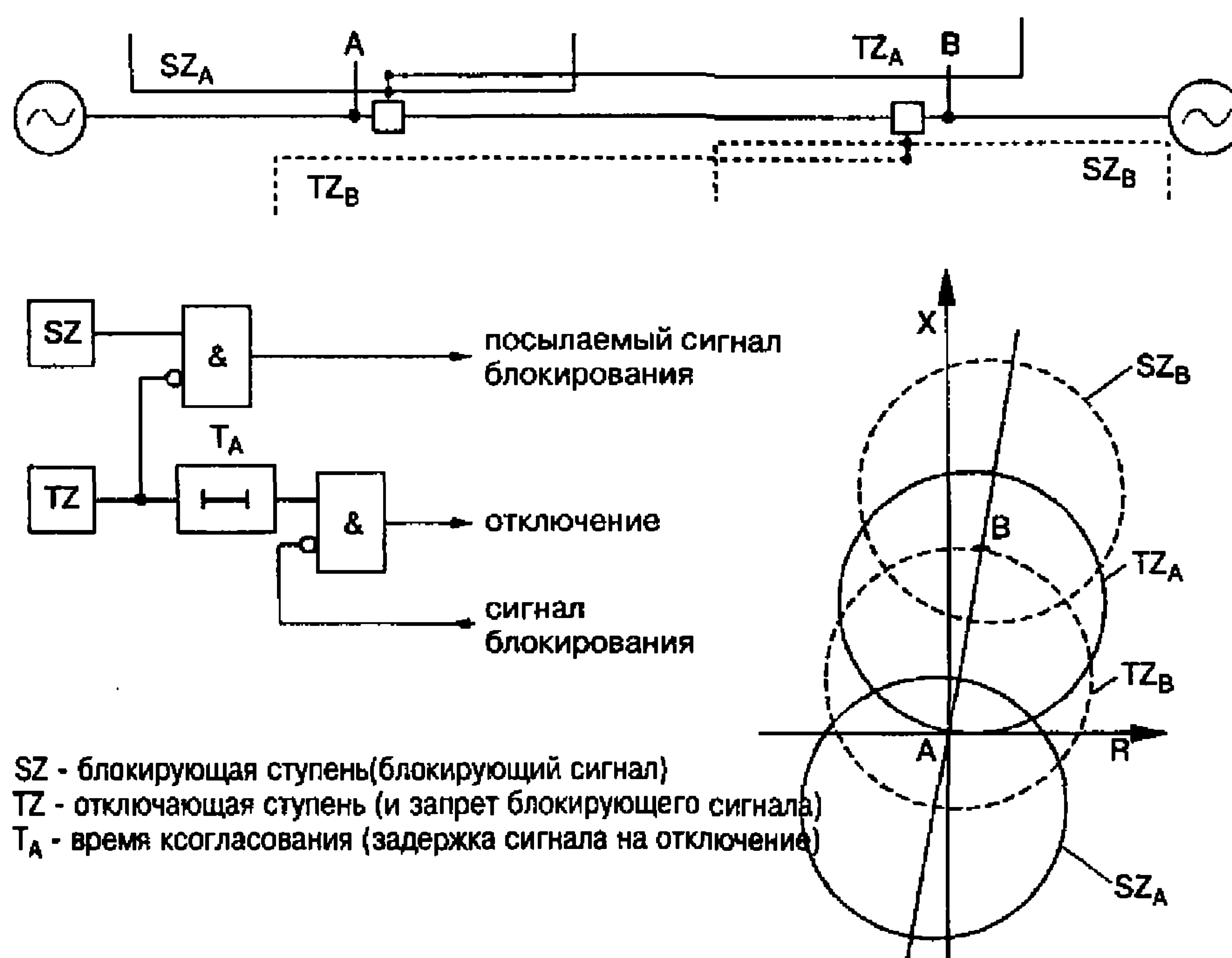


Рис. 3.41. Использование блокирующих сигналов в защите с круговыми характеристиками срабатывания РС

необходимо для повышения надежности ее работы при близких (внешних) КЗ в обратном направлении. При этом также возрастает скорость передачи блокирующего сигнала при близких КЗ. Необходимость смещения является следствием использования для направленных измерений напряжения контура КЗ. Маленькое напряжение не позволяет точно определить направление. Быстродействующий токовый орган определения замыкания на землю часто используется как дополнительный критерий для передачи блокирующего сигнала при замыканиях на землю.

Таким образом, близкие замыкания на защищаемом фидере могут вызвать пуск блокирующего сигнала. Однако, он сбрасывается, как только срабатывает отключающая ступень, действующая в прямом направлении.

Времена срабатывания блокирующей ступени $T_{бл}$ и передачи блокирующего сигнала $T_{кс}$ учитываются при определении необходимого замедления T_A в цепи формирования отключающего сигнала:

$T_A = T_{бл} + T_{кс} - T_{отк} + \Delta t$ (мс), где $T_{отк}$ — время срабатывания отключающей ступени, Δt = 5 мс — время запаса.

Важным преимуществом использования блокирующих сигналов является отсутствие необходимости передавать какие-либо сигналы, если замыкание находится в защищаемой зоне. Следовательно, при передаче ВЧ сигналов по ЛЭП (PLS) сигнал не проходит через место повреждения.

По этой причине возможна передача сигналов телеуправления по проводам защищаемой ЛЭП с высокочастотной обработкой их по схеме фаза—земля.

Классическое применение блокирующего принципа предполагает применение

простого, но быстродействующего ВЧ канала связи по защищаемой ЛЭП (< 5 мс) с амплитудной модуляцией. Дополнительное преимущество этого метода заключается в том, что одна и та же несущая частота может быть использована на всех концах фидера (в том числе и на трехконцевых линиях), т.к. не имеет значения, от какого передатчика был получен блокирующий сигнал.

На рис. 3.42 приведен пример использования этого принципа для цифровой дистанционной защиты с многоугольными характеристиками срабатывания реле.

Передача блокирующего сигнала осуществляется только при срабатывании пусковой ступени при условии, что замыкание находится в обратном направлении, т. е. «за спиной» у защиты.

Т. к. при определении направления используются напряжения «здоровых» фаз, достигается абсолютная селективность даже при близких коротких замыканиях.

Реле 7SA522 и 7SA6 включают в себя дополнительный орган определения скачка (приращения) напряжения или тока для быстрого пуска блокирующего сигнала в течение 5-ти мс после возникновения замыкания. Поэтому задержка сигнала на отключение может быть значительно сокращена.

Ступень отключения образована направленной ступенью с полным охватом защищаемого фидера Z_{1B}.

На рис. 3.42 хорошо видно, что пусковая зона имеет смещение в обратном направлении, охватывающее зону отключения ступени защиты, установленной на противоположном конце линии, причём с достаточным для всех видов КЗ запасом.

<u>Дистанционная защита с деблокировкой (сравнение направлений с помощью деблокировки)</u>

Способ блокировки, описанный выше, имеет тот недостаток, что при функционировании в нормальном режиме работы,

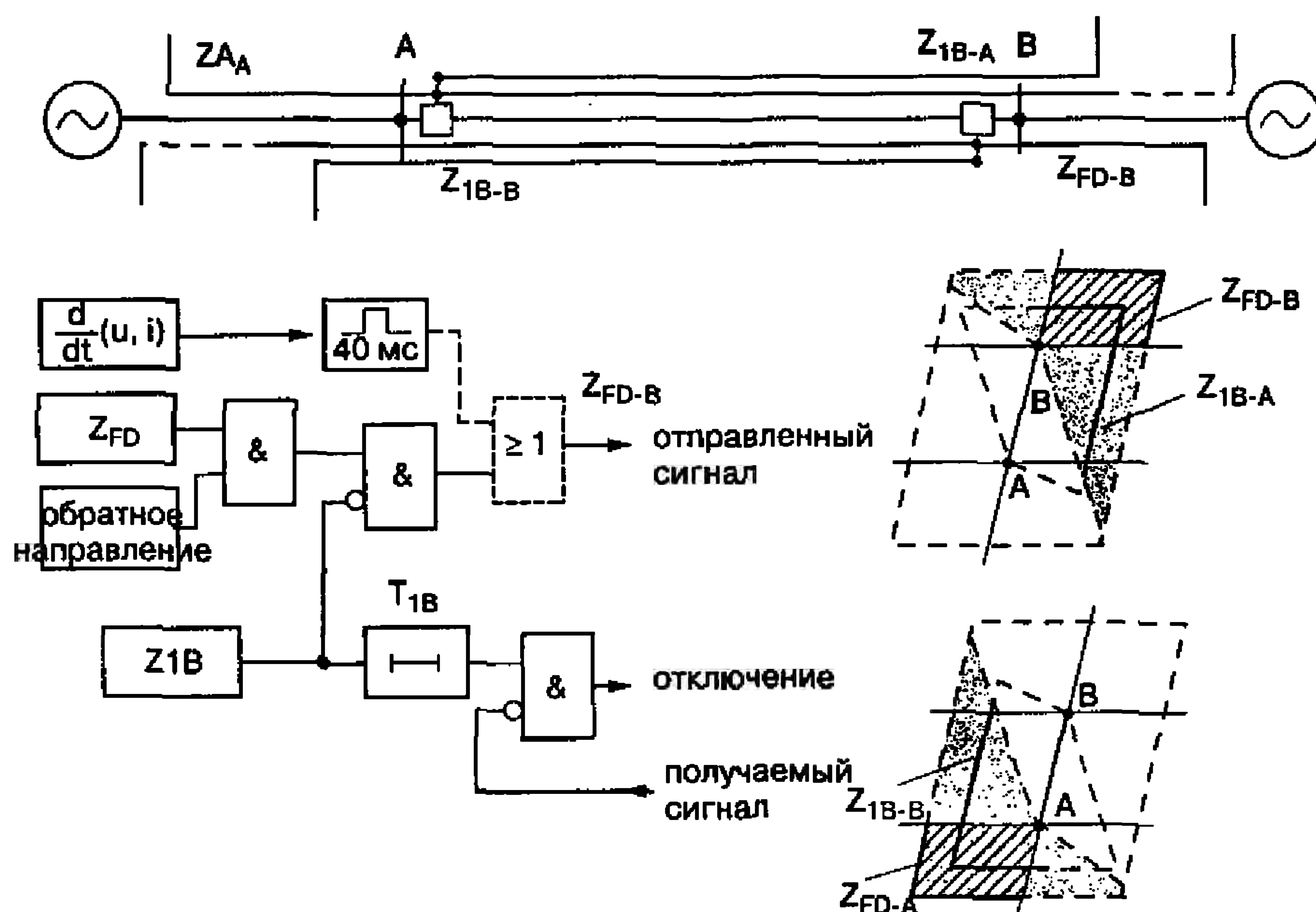


Рис. 3.42. Дистанционная защита с четырехугольной характеристикой и передачей блокирующих сигналов (7SA522)

т. е. в отсутствие КЗ, сигналы в канале связи отсутствуют и, следовательно, его состояние не контролируется.

Способ деблокировки был специально разработан для передачи по каналам связи сигналов звуковой частоты (с использованием фазо-частотной модуляции). Он не имеет описанного недостатка.

Кроме того, этот способ несколько повышает быстродействие, т. к. постоянно передаётся контрольный сигнал. При внутренних замыканиях сигнал заменяется на разрешающий, аналогично способу сравнения с помощью передачи разрешающих сигналов (POTT). Это означает, что при действии на отключение не требуется замедления, как в предыдущем случае, связанного с ожиданием блокирующего сигнала (см. рис. 3.43).

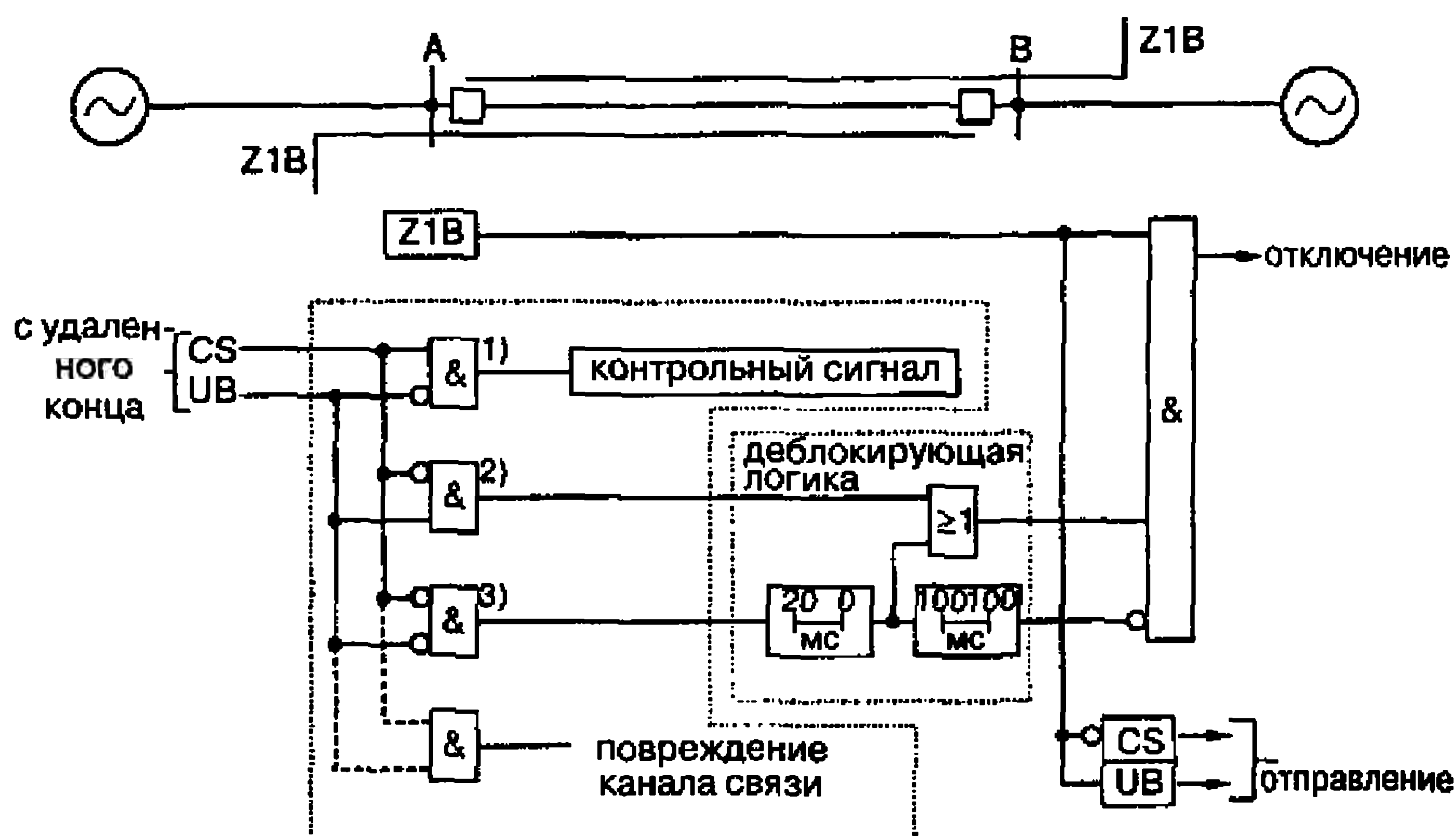
Для реализации способа только одна направленная ступень с полным охватом защищаемого фидера требуется на каждом конце линии.

В отсутствие повреждений по каналу связи передаётся контрольная частота f_{CS} и отключение блокировано.

При возникновении внутреннего замыкания ступени с полным охватом Z_{1B} на обоих концах линии срабатывают и происходит переключение канала передачи с контрольной частоты f_{CS} на рабочую f_{UB} (частота сигнала деблокирования). Защиты на обоих концах линии срабатывают (см. логическую схему).

При внешних замыканиях ступень Z_{1B} *не срабатывает (замыкание в обратном* направлении) или не появляется сигнал деблокировки (замыкание расположено за удалённым концом).

Если ступень Z_{1B} сработала, но не получено ни сигнала f_{CS}, ни f_{UB} (канал связи был повреждён при замыкании в системе), очевидно, что сигнал не может быть передан через место короткого замыкания, т. е. замыкание произошло на защищаемом фидере.



1) Получение контрольного сигнала (CS)
2) Получение деблокирующего сигнала (UB)
3) Нарушение канала

Рис. 3.43. Дистанционная защита в схеме с деблокировкой

По истечении 20 мс после повреждения канала, разрешено срабатывание ступени Z_{1B} в течение 100 мс. Если это произошло в период существования замыкания, то будет осуществлено отключение. Если повреждение канала связи произошло в период нормальной работы системы, то никаких последствий не возникает, т. к. Z_{1B} не срабатывает. Через 100 мс защита снова блокируется на время существования повреждения канала. Блокировка снимается (время возврата 100 мс), если сигнал снова получен.

Одновременное получение сигналов обеих частот рассматривается как ошибка и не вызывает каких-либо действий со стороны защиты.

3.1.11. Блокировка при качаниях мощности, отключение качаний мощности (защита от выпадений из синхронизма)

На рис. 3.44 представлена диаграмма напряжений нагруженной воздушной линии. Питающие сети представлены двумя эквивалентными источниками E_1 и E_2. Сопротивления источников Z_{S1} и Z_{S2} определяются, исходя из соответствующих мощностей КЗ источников. Угол ϑ называется углом передачи (углом расхождения ЭДС). При увеличении передаваемой активной мощности угол передачи увеличивается.

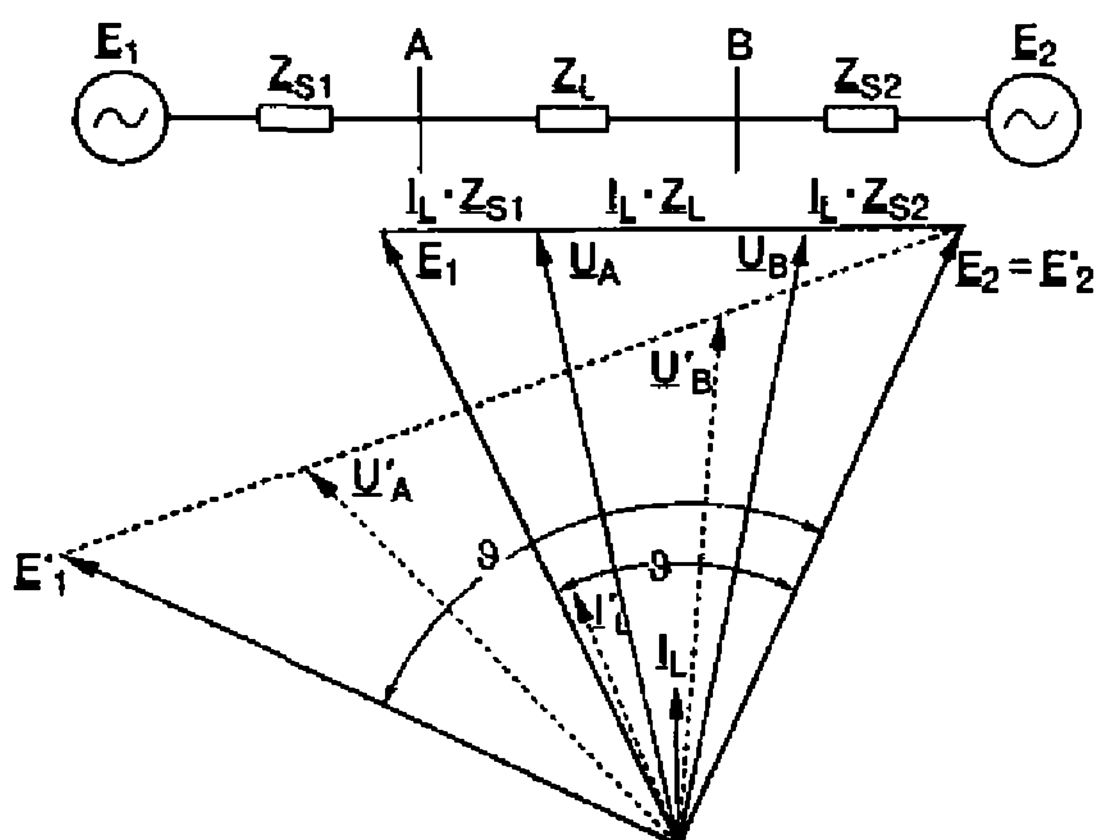


Рис. 3.44. Диаграмма напряжений при качаниях в системе

Передаваемая мощность определяется соотношением:

$$P_{пер} = \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_\Sigma} \cdot \sin\vartheta, \quad (3.5)$$

$$\text{где } Z_\Sigma = Z_{S1} + Z_L + Z_{S2} \quad (3.6)$$

Статическая устойчивость

Максимум передаваемой мощности достигается при угле $\vartheta = 90°$. В то же время он соответствует пределу статической устойчивости. При его превышении устойчивость может быть нарушена.

На практике, однако, этот угол для обеспечения запаса устойчивости, как правило не превышает 60°.

Если все напряжения разделить на ток нагрузки, то можно получить эквивалентную *диаграмму сопротивлений нагруженной линии*. На этой диаграмме начало координат соответствует месту установки реле сопротивления (рис. 3.45).

При таком представлении можно легко определить полное сопротивление нагрузки, измеряемое защитой и его расположение относительно характеристики срабатывания реле.

При изменении нагрузки (или в режиме качаний) конец вектора сопротивления, измеряемого реле, перемещается по указанным на рис. кривым [3.7]. Кривые являются дугами окружности с центром в III квадранте при $E_1 < E_2$ и в I — при $E_1 > E_2$. При $E_1 = E_2$ (в первом приближении при нормальных условиях работы системы), конец вектора сопротивления перемещается по прямой линии, которая перпен-

Рис. 3.45. Изменение измеряемого сопротивления при качаниях в системе

дикулярна отрезку, соответствующему суммарному полному сопротивлению Z_Σ (и проходит через его середину).

Даже при максимуме передаваемой мощности, т. е. $\vartheta = 90°$, сопротивление нагрузки с достаточным запасом должно превышать значение сопротивления, соответствующее наибольшей области срабатывания реле, приблизительно на 20 % ($Z_{нагр}\cos\varphi_{нагр} \geq 1{,}2\,R_р$), для предотвращения срабатывания реле при изменении нагрузки в нормальном режиме работы системы.

При расчёте двухцепных линий необходимо учесть, что значение сопротивления нагрузки должно быль уменьшено в 2 раза, если одна из цепей отключена.

Уставки в R-направлении также должны быть уменьшены в 2 раза.

Динамическая устойчивость

Динамический угол может составлять более 90° без каких-либо нарушений устойчивости. Это утверждение основано на правиле «равных областей» (см. рис. 3.46). Передаваемая мощность определяется заданным соотношением и соответствует синусоидальной кривой, зависящей от угла нагрузки ϑ. Расчетная точка работы зависит от установленной мощности турбин P_T.

При КЗ в электрической сети вследствие глубокого снижения напряжения резко снижается передаваемая мощность. Из-за нарушения равновесия между передаваемой мощностью и мощностью, развиваемой турбинами, возникает избыточная мощность турбин, под действием которой роторы генераторов ускоряются, а угол ϑ растёт. За время до отключения КЗ (точка 2) он достигает значения ϑ_1 (A — площадка ускорения). В момент отключения КЗ электрическая мощность возрастает и становится больше мощности турбин (точка 3). Электрическая мощность после аварийного режима характеризуется синусоидой 3. В точке 3 начинается процесс торможения ротора. Он продолжается в течение бестоковой паузы (B — площадка торможения). Точка 4 соответствует успешному АПВ, т.к. электрическая мощность в этом случае больше мощно-

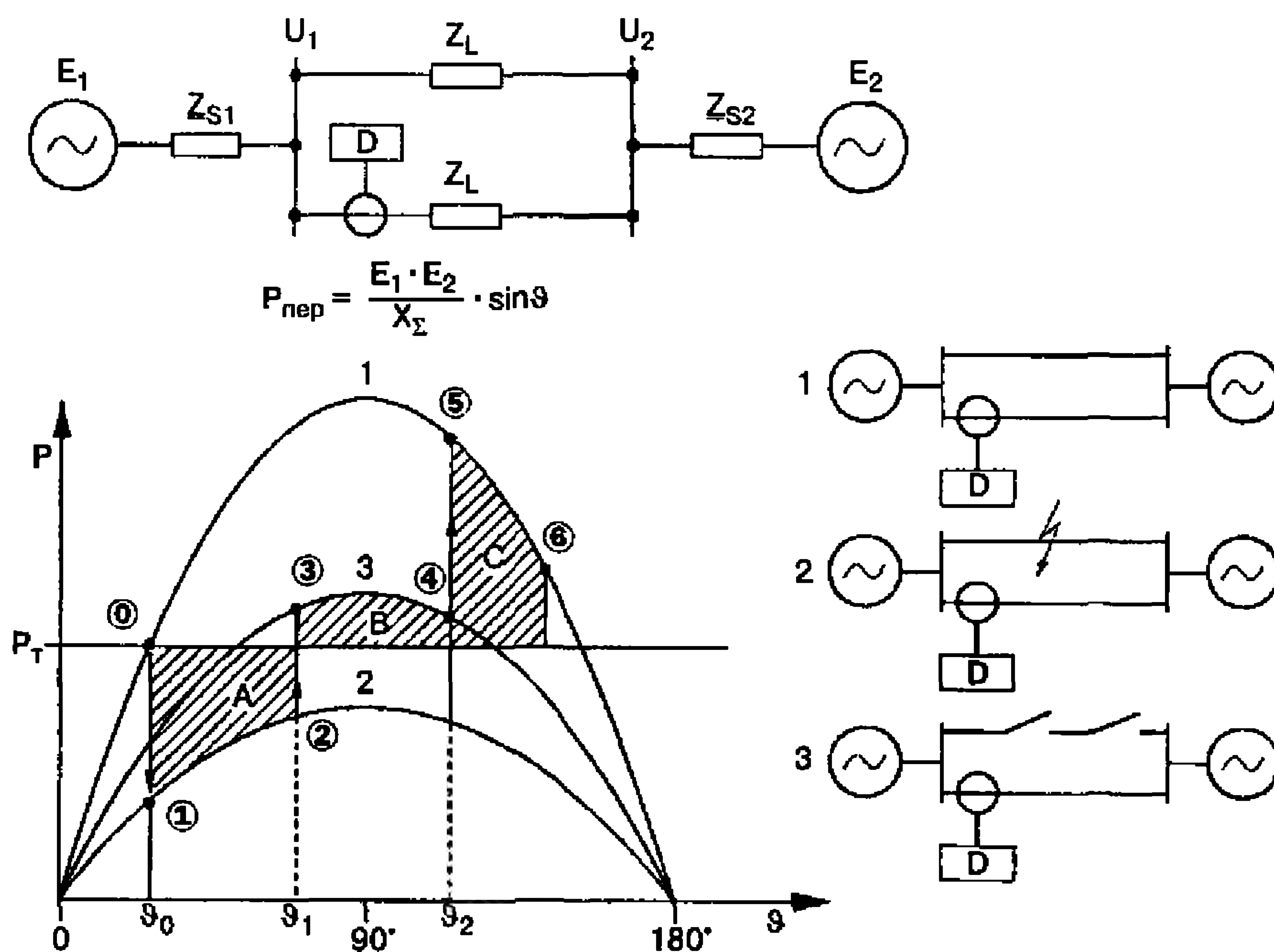


Рис. 3.46. Динамическая устойчивость системы, правило равенства областей

сти турбин (область С). Генераторы опять вернутся в зону устойчивой работы, если площадь области торможения В + С останется больше области ускорения А.

Естественно, это произойдет только в том случае, если замыкание в энергосистеме быстро устранилось (критическое время устранения замыкания).

Блокировка при качаниях

Процесс качаний мощности, описанный выше, представлен в комплексной плоскости сопротивлений на рис. 3.47.

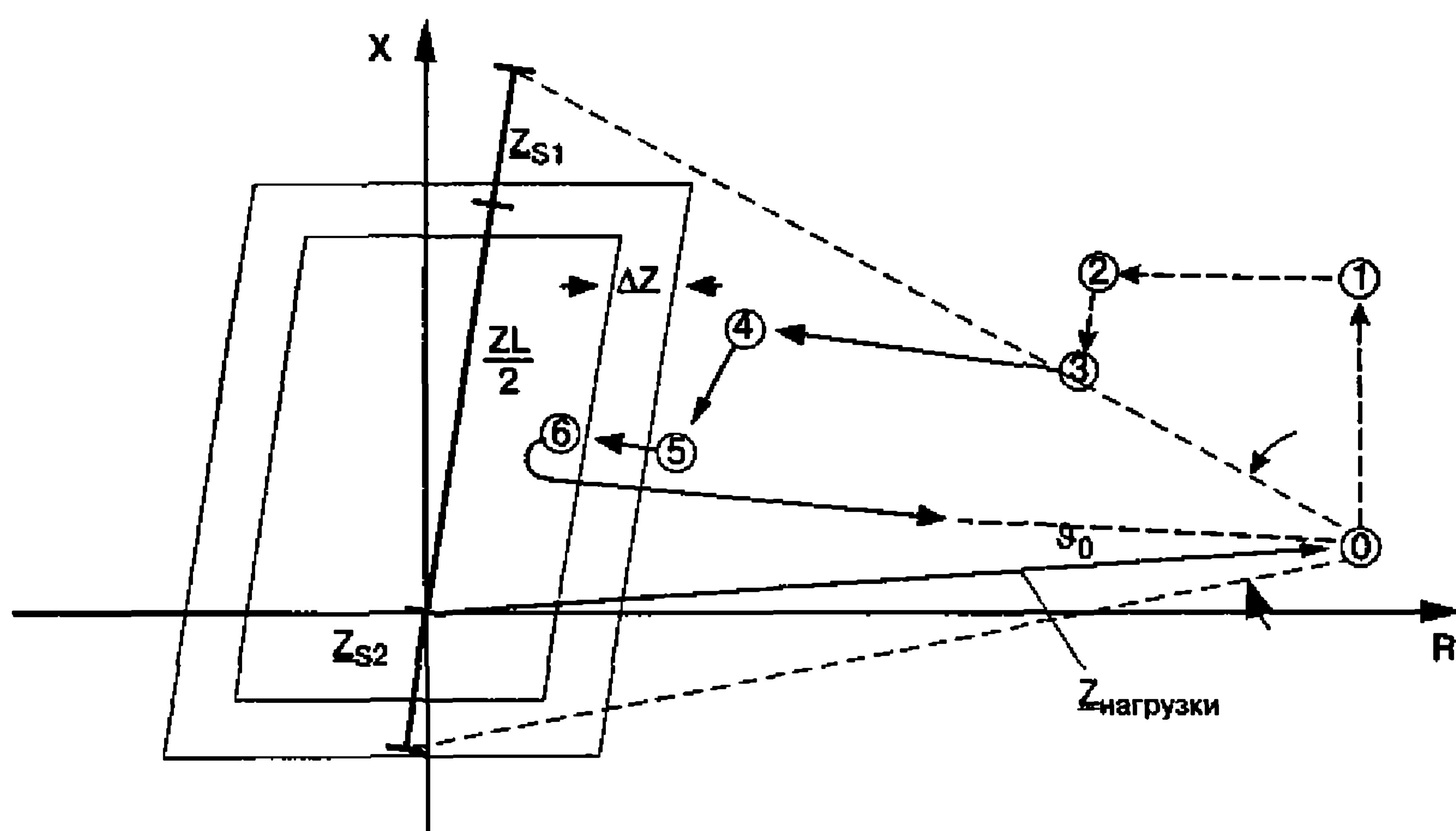


Рис. 3.47. Траектория изменения вектора сопротивления при качаниях

В устойчивом режиме работы включены обе линии. Схема сети соответствует рис. 3.46. Угол измеренного сопротивления нагрузки равен углу ϑ_0.

При возникновении замыкания на соседней цепи, полное сопротивление сначала скачком изменяется до значения сопротивления цепи замыкания, которое защита *D* расценит как внешнее (1). После того, как будут отключены выключатели на поврежденном фидере (2) своей защитой, сопротивление, определяемое защитой *D*, опять изменится скачком до сопротивления нагрузки (3), которое теперь соответствует большим значениям угла ϑ_1 и сопротивления передачи (первоначально: $\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_{S1} + \underline{Z}_L/2 + \underline{Z}_{S1}$, теперь $\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_{S1} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{S2}$. Угол передачи равен ϑ_2 (4).

Последующее АПВ линии приведет к тому, что вектор сопротивления перемещается в точку (5), а затем попадает в область пусковой характеристики дистанционной защиты (6).

Если не произойдёт отключение, то вектор полного сопротивления нагрузки вернётся в первоначальное устойчивое положение.

Если вектор полного сопротивления нагрузки попадет в соответствующую область срабатывания, и будет оставаться там в течение определённого времени, может произойти срабатывание защиты.

Отключение при существовании качаний мощности в системе может быть запрещено с помощью так называемой функции блокировки при качаниях. Её принцип действия основан на том, что в случае возникновения замыкания полное сопротивление изменяется скачкообразно от рабочего значения до значения сопротивления короткозамкнутой цепи, находящегося внутри области срабатывания дистанционной защиты. И наоборот, в случае возникновения качаний мощности в системе, вектор полного сопротивления постепенно изменяет своё положение. Скорость его изменения соответствует частоте качаний мощности в системе.

Измеряя dZ/dt или $\Delta Z/\Delta t$ и сравнивая их с пороговыми значениями, можно определить режим в системе: КЗ или качания.

Наиболее простой реализацией этого способа является определение времени прохождения вектором сопротивления зоны ΔZ между двумя характеристиками срабатывания. Для этой цели в дистанционной защите используется дополнительная характеристика, охватывающая пусковую (характеристика качаний мощности) с определённой постоянной зоной ΔZ, а время её прохождения Δt измеряется (рис. 3.47).

Это время будет тем меньше, чем меньше период качаний.

Для распознавания быстроразвивающихся качаний с малым периодом уставка ΔZ должна быть как можно больше, а Δt как можно меньше.

Типичные уставки: ΔZ = 10—20 % Z_A и Δt = 20—40 мс. При таких уставках возможно распознавание качаний с частотой 2—3 Гц.[1]

При использовании специальных измерительных устройств возможно определение качаний с частотой приблизительно 7Гц (7SA513 и 7SA522). В этом случае необходимо постоянное измерение $\Delta Z/\Delta t$ на коротких интервалах (5 мс).

Если выявлен режим качаний, то блокирующий сигнал должен подаваться в течение всего времени, пока вектор полного сопротивления нагрузки (в данном случае, вектор качаний мощности) находится внутри пусковой характеристики. Или

---

[1] В случае 7SA511 Δt = 35 мс фиксировано. ΔZ и наибольшее значение dZ/dt устанавливается (см. пример в п.п. 6.3.6)

возможно снятие блокирующего сигнала после определённой выдержки времени.

Естественно, наличие сигнала блокировки *при качаниях создаёт определённый* риск того, что реальное короткое замыкание в течение времени блокирования не будет отключено. Поэтому сигнал блокировки формируется только в *симметричном режиме системы*. Несимметрия (> 25 %) или появление тока нулевой последовательности мгновенно снимают блокировку (7SA5**).

Более того, продолжительность режима качаний в системе может контролироваться (7SA6 и 7SA522). Если возникает скачок, то блокировка мгновенно снимается. Поэтому аварийный режим определяется даже в маловероятном случае возникновения трёхфазного КЗ, когда вектор *качаний мощности находится внутри пус*ковой характеристики срабатывания защиты (т.е. при наложении КЗ на качания).

В конечном счёте, можно выбрать ступени дистанционной защиты, которые будут блокироваться при качаниях мощности, т. е. например, все зоны, или только первая зона или все зоны кроме первой. В некоторых случаях, первая зона не блокируется, когда для отключения необходимо получить очень большое значение угла передачи (близкое к 180°) [при достаточно узкой характеристике первой зоны в R-направлении]. В этом случае допускают, что система недолго будет находиться в стабильном состоянии и отключение желательно.

Блокировка ступеней с большими защищаемыми зонами не требуется, если не ожидается медленных качаний мощности в системе, т. е. вектор качаний выйдет из зоны до того, как будет набрана выдержка времени соответствующей ступени.

В принципе, эти ограничения накладывались традиционными реле, где ещё не применялись функции несимметрии и непрерывного контроля. Поэтому было невозможно исключить вероятность блокировки *действия защиты при наложении* КЗ на качания.

Если системные условия таковы, что необходима функция блокировки при качаниях мощности в системе, в цифровых *защитах рекомендуется блокировка всех* ступеней, т.к. траектория и частота качаний зависят от многих факторов и никогда не могут быть точно спрогнозированы.

В стабильных системах с сильной подпиткой и без длинных линий передачи блокировка от качаний мощности не требуется. В Германии такая блокировка не применяется.

3.1.12. Дистанционная защита с АПВ

Дистанционная защита на большинстве воздушных линий электропередачи применяется совместно с устройствами автоматического повторного включения (АПВ). Для традиционных реле использовалось отдельное устройство АПВ. При использовании цифровой технологии данная функция включена в реле.

Трёхфазное АПВ

В Германии в системах среднего и высокого напряжения без эффективного заземления нейтрали применяется трёхфазное АПВ. Трехфазное АПВ также применяется *в системах с заземлением в некоторых* других станах, особенно в США.

При использовании трёхфазного АПВ, в случае возникновения любого вида КЗ отключаются все 3 фазы, а затем автоматически включаются через 0,3—0,5 с. Время деионизации в точке возникновения короткого замыкания равно приблизительно [3.8]:

$t = 210 + 0{,}6 \cdot кВ$ [мс] (3.7)

Для изоляции места КЗ и прекращения подпитки дуги, предупреждающего её дальнейшее развитие, оба конца линии должны быть отключены без выдержки времени.

Это возможно при использовании одной из описанных выше защит с разрешающими сигналами, если существует соответствующий канал для передачи сигнала.

В сетях более низкого напряжения такие защиты практически не применяются из-за высокой стоимости. В этом случае дистанционная защита работает в режиме расширения зоны: замыкания К1 и К2 отключаются ступенью с полным охватом $Z_{пол}$ (приблизительно 120 %) без выдержки времени с обоих концов (рис. 3.48), т. е. допускается неселективное действие защиты. После отключения КЗ (в бестоковую паузу АПВ) уставка ступени защиты, действующей без выдержки времени, снижается автоматически до значения, соответствующего ступени с неполным охватом зоны $Z_{неп}$ (80—90 %). Таким образом в случае неуспешного АПВ (при включении на установившееся КЗ) защита работает селективно и отключает повреждение с выдержкой времени соответствующей ступени.

Недостатком такого выполнения является допущенная неселективность, т. е. возможность срабатывания защиты при внешнем КЗ (К3) с последующим действием АПВ (что нежелательно).

Однако, помимо короткого перерыва питания потребителей, подключённых к шинам подстанции, других отрицательных последствий не будет. Вероятность этого нежелательного АПВ в любом случае сильно ограничена в разветвлённых системах, т. к. зона излишнего охвата очень мала благодаря эффекту дополнительной подпитки (см. п.п. 3.5.2).

В традиционных реле применяются способы как расширения, так и сокращения зоны быстрого отключения. Это зависит от того, была ли быстродействующая ступень введена в работу пусковым органом определения замыкания или она введена постоянно (ПО отсутствует).

В цифровых реле нет необходимости в переключении ступеней. Необходимо просто разрешить или заблокировать расширенную зону.

АПВ с замедлением

В сетях среднего напряжения часто применяется АПВ с увеличенной выдержкой времени при втором включении после неуспешного первого быстродействующего. С этой целью, в цифровых реле возможно применение специально установленной ступени.

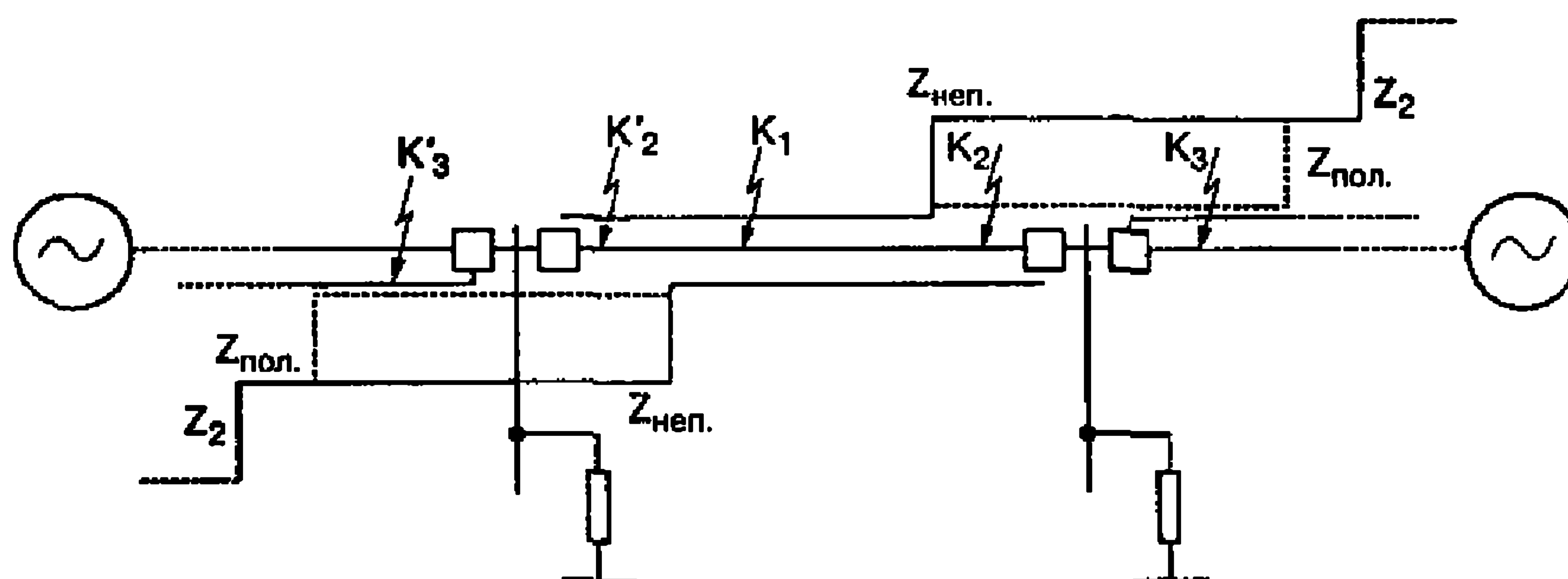


Рис. 3.48. Сочетание неселективного действия ступени (с полным охватом зоны) с АПВ

АПВ на воздушных линиях с кабельными секциями

АПВ имеет смысл только в случае кратковременных замыканий на воздушных линиях (особенно при КЗ, возникающих вследствие ударов молнии или перекрытий на деревья). В принципе, при замыканиях на кабелях АПВ не применяется.

Обычно, в прошлом, на воздушных линиях с кабельными секциями АПВ не применялось, т. к. при срабатывании защиты место КЗ оставалось неизвестным.

При соответствующих уставках ступеней цифровая защита 7SA способна различать замыкания на воздушных линиях и кабельных секциях. Это позволяет использовать АПВ только при возникновении замыканий на линии (см. п.п. 5.2.1).

Однофазное АПВ (ОАПВ)

В сетях с заземлённой нейтралью высокого и сверхвысокого напряжения обычно применяется однофазное АПВ.

В этом случае, при однофазном КЗ на землю отключается только повреждённая фаза. Время срабатывания ОАПВ в этом случае должно быть больше, чем время срабатывания трёхфазного АПВ, т. к. неповреждённое фазы остаются включёнными, и наводимые ими токи подпитывают (поддерживают) дугу (рис. 3.49).

При увеличении длины линии наводимые токи увеличиваются, при этом необходимо увеличение времени срабатывания.

В соответствии с [3.9] однофазное АПВ является успешным, если выполняется следующее условие:

$$I_{дуги}[A] \leqslant 43(t_{САПВ}[c] - 0{,}2), \qquad (3.8)$$

где $t_{САПВ}$ — время срабатывания АПВ.

Однако на длинных линиях по условиям сохранения устойчивости необходимо малое время срабатывания АПВ, а для уменьшения тока дуги используются компенсирующие реакторы (см. табл. 3.1) [3.10].

В системах Германии установка компенсирующих реакторов не требуется. Время срабатывания АПВ принимается близким к 1с.

В некоторых случаях однофазное АПВ также применяется при двухфазных КЗ без земли для того, чтобы, например, исключить отключение трёх фаз при раскачивании проводов («пляска»). Дистанционные защиты 7SA позволяют это, предос-

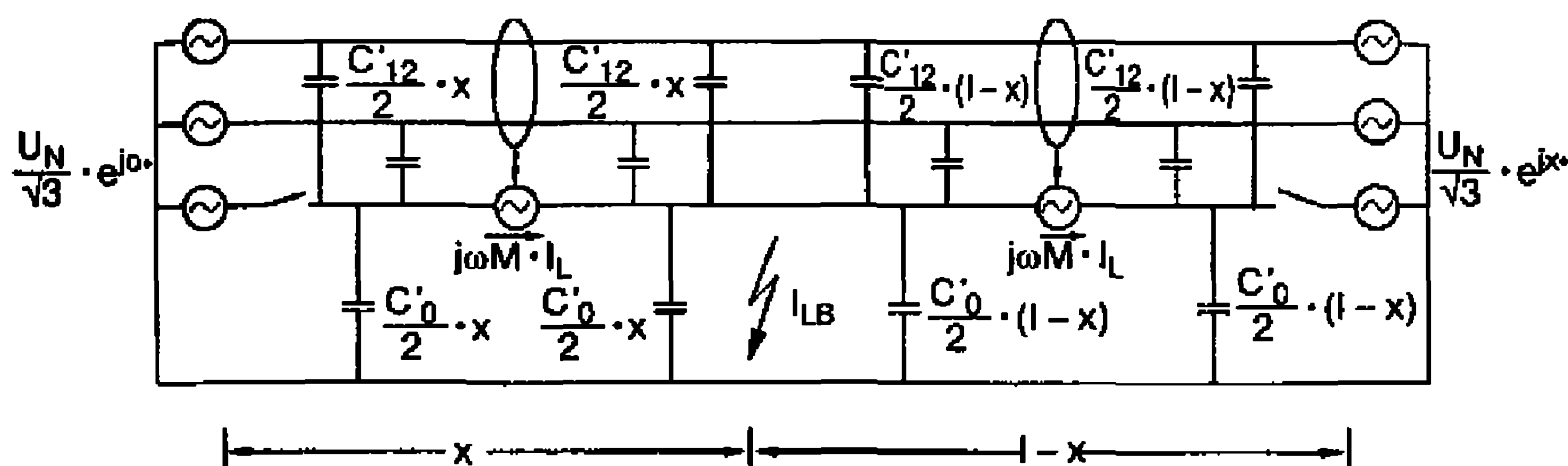


Рис. 3.49. Однофазное АПВ, наведенные индуктивные и емкостные токи

Наведенный емкостный ток дуги:

$I_{LB_C} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot C_{12} \cdot l$, U_N — номинальное напряжение сети

Наведенный индуктивный ток дуги:

$I_{LB_C} = I_L \cdot j\omega M' \left(\frac{l}{2} - x\right) \cdot \omega \cdot (C_0' + 2\,C_{12}') \cdot l$

Таблица 3.1

НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, кВ	ДИАПАЗОН ДЛИН ЛИНИЙ, ПРИ КОТОРЫХ НЕ ТРЕБУЮТСЯ КОМПЕНСИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ, км	ДИАПАЗОН ДЛИН ЛИНИЙ, ПРИ КОТОРЫХ ПОГАСАНИЕ ДУГИ БЕЗ КОМПЕНСИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ НЕ ГАРАНТИРОВАНО, км
765	0—80	80—130
500	0—100	100—160
345	0—230	230—420
230	0—430	480—800

тавляя возможность выбора отключаемой фазы: опережающей или отстающей.

При использовании однофазного АПВ необходима дистанционная защита с точной фазной селективностью, обладающая возможностью независимого отключения каждой фазы, как было описано выше в п.п. 3.1.9.

Более того, дистанционная защита в других фазах не должна ложно срабатывать в течение времени срабатывания АПВ, т. к. это блокировало бы АПВ в дальнейшем.

Это является особой проблемой на длинных, сильно нагруженных линиях.

По этой причине в традиционных реле необходимы жёсткие ограничения уставки в *R*-направлении.

Цифровые дистанционные реле 7SA6 и 7SA522 автоматически подстраивается под эту ситуацию: во время срабатывания АПВ ток нулевой последовательности (остаточный ток или ток стекания на землю) исключается из расчёта полного сопротивления для определения замыкания.

Этим предотвращается попадание вектора сопротивления нагрузки в неповреждённых фазах в область срабатывания пусковой характеристики.

Комментарий:

Если используется направленная защита от замыканий на землю (10—20 % I_N, где I_N — номинальный ток), она должна быть заблокирована на время срабатывания однофазного АПВ (в цикле ОАПВ) для предотвращения ложного отключения из-за тока нагрузки, протекающего через землю. (В 7SA6 и 7SA522 включена направленная защита от замыканий на землю и может быть установлена её автоматическая блокировка.)

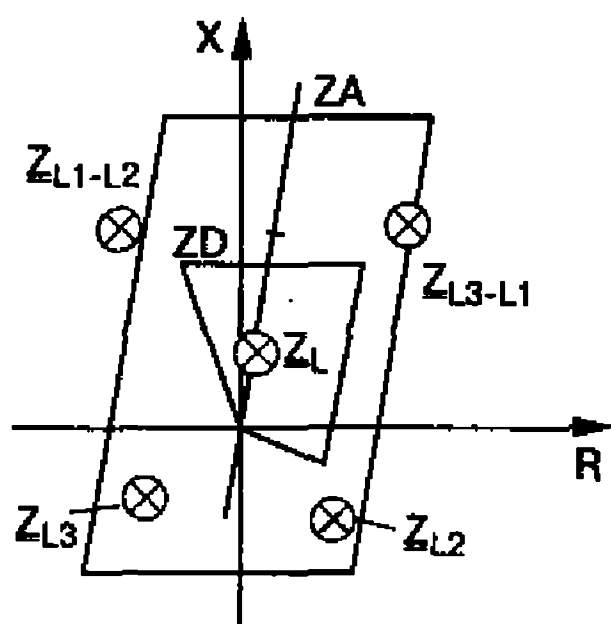
В случае односистемного дистанционного реле (7SA511) фазное селективное отключение всегда контролируется пусковыми органами, срабатывающими при КЗ. В этом случае АПВ также должно управляться пусковыми органами.

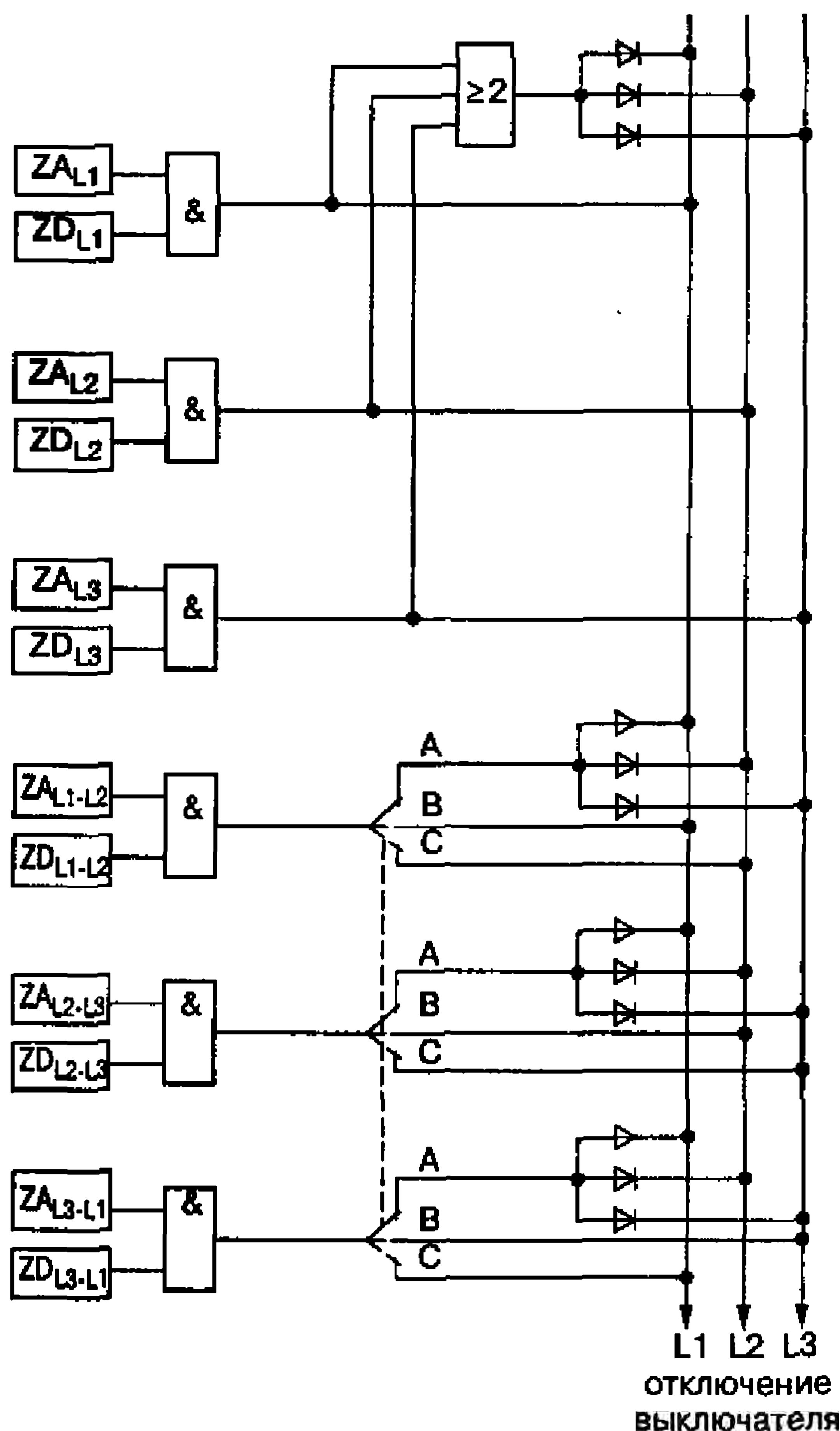
В случае использования реле с полной схемой измерений, быстрое отключение повреждённой фазы возможно только, если, помимо срабатывания ПО для данной фазы, замыкание было определено внутри соответствующей зоны. Трёхфазное действие при многофазных КЗ обеспечивается не ПО, а ступенями дистанционной защиты. В этом случае обеспечивается повышенная фазная селективность (рис. 3.50, *а*). Таким образом, возможно правильное однофазное отключение, даже при определении замыкания в нескольких контурах.

Однофазное АПВ при двойных однофазных замыканиях на землю

В заземлённых системах двойные замыкания на землю в разных точках являются редкостью. Однако, на многоцепных фидерах, они могут быть вызваны обратными перекрытиями, когда потенциал

а) Сопротивление шести контуров (петель) в реле сопротивления при однофазном КЗ на землю L1-E ($K_A^{(1)}$)





A: трехфазное отключение при двухфазном замыкании
B: отключение только опережающей фазы
C: Отключение только отстающей фазы
б) Логическая схема

Рис. 3.50. Дистанционная защита: логика отключения

опоры растёт вследствие удара в неё молнии. Вероятность этого повышается, если сопротивление заземления опоры велико (например, в горной местности).

В этом случае пуск АПВ по факту отключения более предпочтителен, т. к. при таких повреждениях почти всегда определяется многофазное замыкание (например, L1-L2-E), тогда как ступень отключения дистанционного реле, несмотря на полный охват (120 %), в большинстве случаев, «не видит» данного замыкания. В этом случае эффект дополнительной подпитки сказывается положительным образом (см. п.п. 3.5.2).

Современные защиты в системах с заземлением обычно используют цепь передачи сигнала для быстрого отключения всей длины линии. Но из-за использования ступени с полным охватом, описанная вероятность неселективного отключения при двойных замыканиях на землю остаётся. Использование расширения зоны в схеме с разрешающими сигналами имеет определённое преимущество перед использованием пускового органа для отключения. Расширяемая зона имеет ограничение (120 %) в то время, как ПО имеет очень большую зону и срабатывает при удалённых повреждениях.

Современные цифровые реле (7SA6, 7SA522) позволяют осуществить телезащиту каждой фазы с передачей цифрового сигнала. Это гарантирует абсолютную фазную селективность в случае двойных замыканий на землю независимо от мест заземления. На рис. 3.51 представлена пофазная направленная схема защиты (POTT).

Селективность при одновременных замыканиях на параллельных линиях гарантируется устройствами с расширением зон. На рис. 3.52 представлена последовательность отключения при опасных

близких КЗ на землю на разных фазах параллельных линий.

При использовании устройств с расширением зоны для управления ОАПВ их эффективность обеспечивается только при однофазных замыканиях. Если определяется многофазное замыкание, зона защиты ступени с полным охватом уменьшается до зоны защиты с неполным охватом (рис. 3.52, *а*). Таким образом, при внешнем коротком замыкании быстродействующие ступени не срабатывают, и происходит селективное однофазное отключение выключателя со стороны В (рис. 3.52, *б*). После этого картина изменяется и реле, установленные на стороне А, определяют однофазные замыкания. Следовательно, они снова расширяют зону срабатывания и отключают повреждённые фазы также селективно. Таким образом, двойное замыкание на землю селективно отключается (рис. 3.52, *в*). Далее АПВ последовательно происходит на обеих цепях.

Единственным недостатком этого метода является то, что удаленное замыкание обнаруживается только после отключения выключателя на противоположном конце (каскадное отключение).

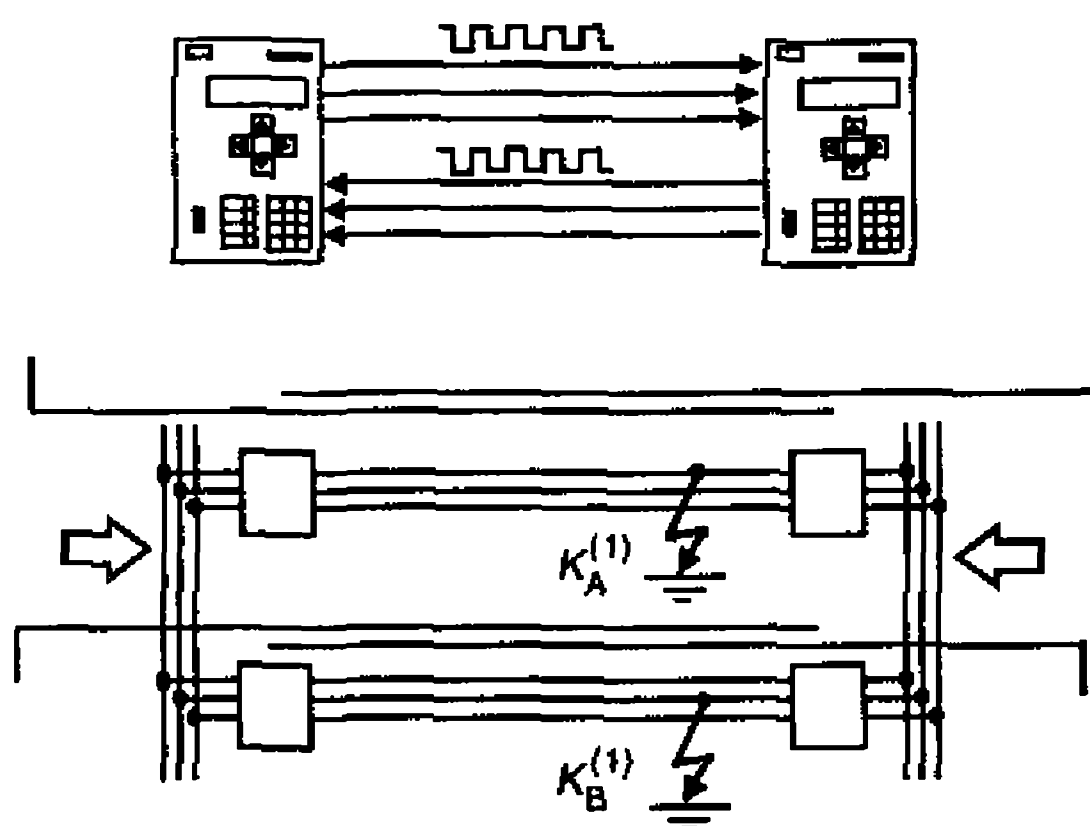
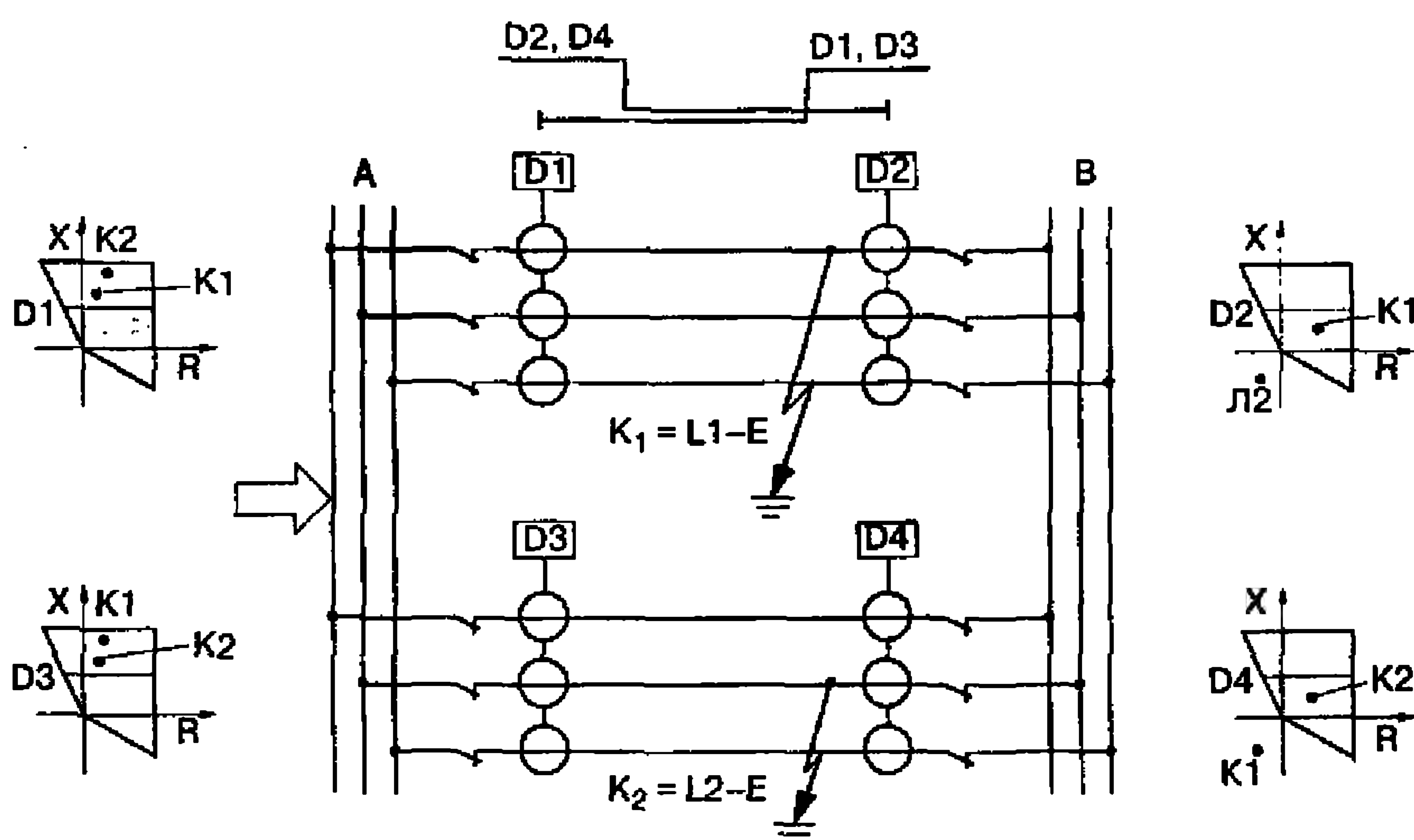


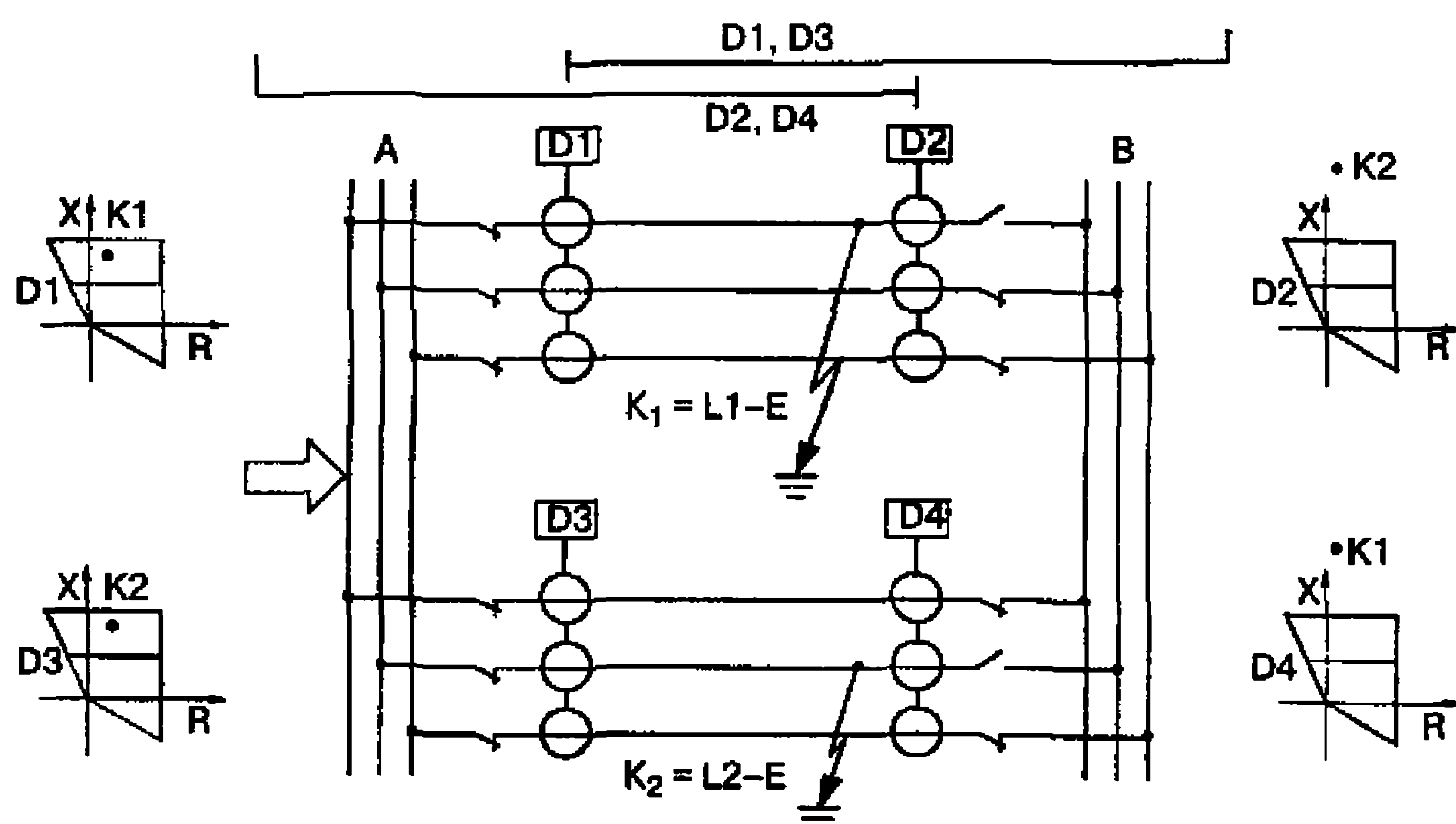
Рис. 3.51. Защита с цифровым каналом связи, обеспечивающая фазную селективность отключения

Преимуществом цифровых дистанционных защит является то, что ступени как с излишним охватом защищаемой зоны, так и с неполным функционируют одновременно. Поэтому область срабатывания пускового органа значительно сокращает-

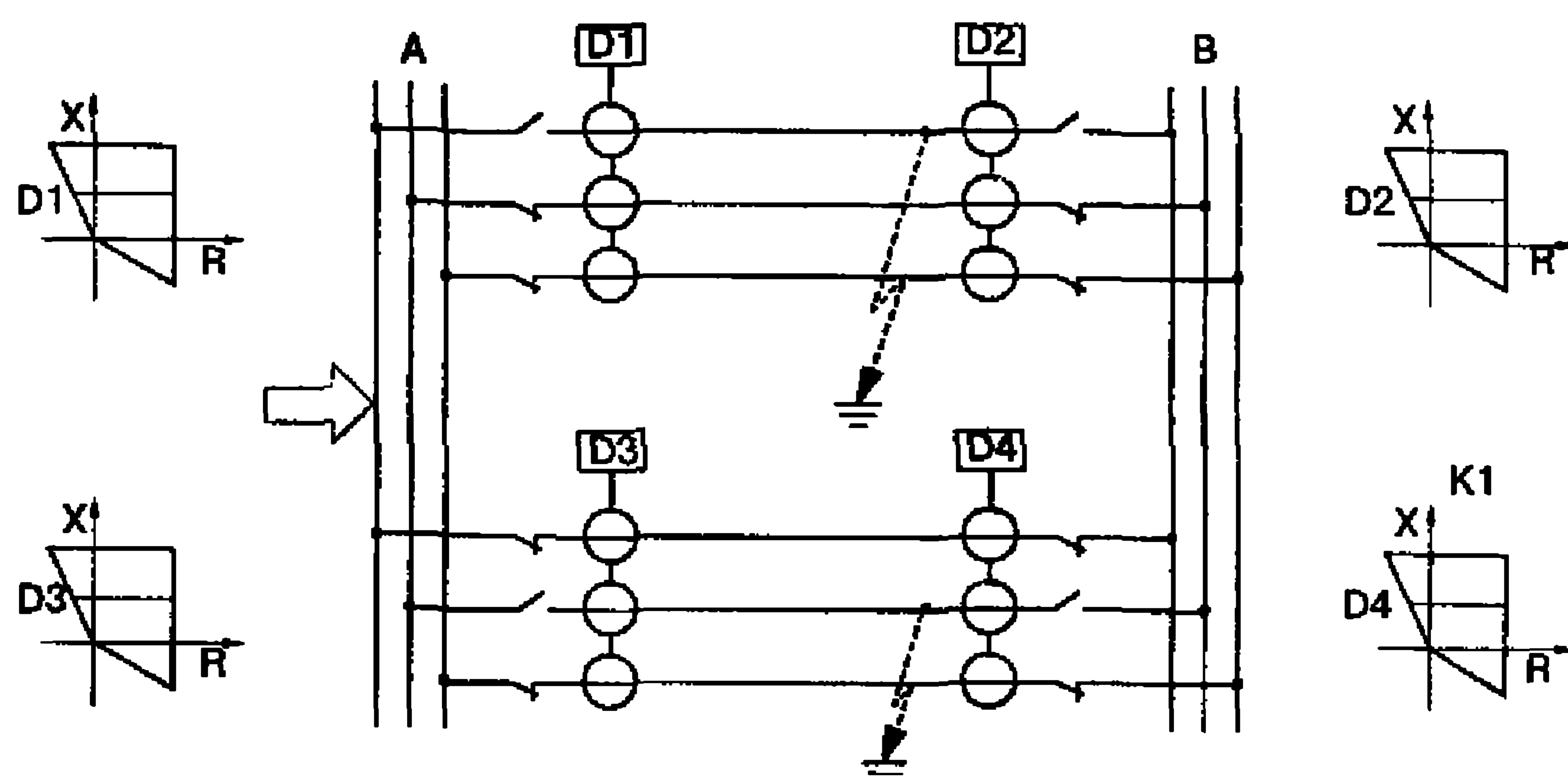


а) Состояние после возникновения КЗ F1 и F2

Рис. 3.52. (Начало)



б) состояние при отключении однофазных замыканий на обоих фидерах со стороны шин В



в) состояние системы после однофазного отключения со стороны шин А (во время срабатывания АПВ)

Рис. 3.52. Последовательность отключения КЗ при установке непереключаемой защиты в сочетании с АПВ и управляемой зоной расширения

ся и каскадное отключение с выдержкой времени возникает только в случае крайне близких коротких замыканий.

При использовании схем защиты с передачей разрешающего сигнала, абсолютная селективность при двойных замыканиях на землю может быть достигнута аналогичным образом. Когда два пусковых органа одновременно обнаруживают замыкания на землю, в то время как только одно из замыканий находится в зоне срабатывания ступени в прямом направлении, передача разрешающего сигнала задерживается.

Однофазное и трёхфазное АПВ

В Германии стараются использовать однофазное АПВ в системах с заземленной нейсталью только при однофазных замыканиях (в особых случаях, также для двухфазных замыканий). В других странах (например, в США) трёхфазное АПВ всегда применяется при всех видах замыканий или только при однофазных замыканиях.

Часто оба варианта применяются одновременно, т.е. однофазное АПВ при однофазных замыканиях и трёхфазное АПВ при многофазных замыканиях. При возникновении в цикле однофазного АПВ повреждения, следующего достаточно быстро за первым (в пределах установленного времени), режим АПВ должен измениться с однофазного на трёхфазный. Иначе произойдет окончательное отключение трёх фаз и функция АПВ будет заблокирована. С другой стороны, АПВ может быть сконфигурировано так, что при последовательных замыканиях всегда будут обеспечены окончательное отключение и блокировка АПВ.

3.1.13. Устройство для определения расстояния до места повреждения

Расстояние до точки замыкания на одиночных линиях пропорционально реактивному сопротивлению короткозамкнутой линии и, поэтому, может быть определено по измеренному току и напряжению цепи короткого замыкания:

$$l(\text{км}) = X_{\text{КЗ}}(\text{Ом})/X'\,(\text{Ом/км}), \quad (3.9)$$

где $X_{\text{КЗ}}(\text{Ом}) = U_{\text{КЗ}}/I_{\text{КЗ}} \cdot \sin\varphi_{\text{кз}}$, (3.10)

X' — удельное сопротивление линии.

При использовании традиционных реле для выполнения этой функции применялись специальные устройства. Первоначально использовалась аналоговая измерительная техника, а затем в них стали использоваться цифровые узлы (рис 3.53) [3.11, 3.12, 3.14].

Цена таких устройств была относительно высока (того же порядка, что и цена дистанционной защиты для сетей высокого напряжения). Поэтому они применялись редко и только в системах СВН.

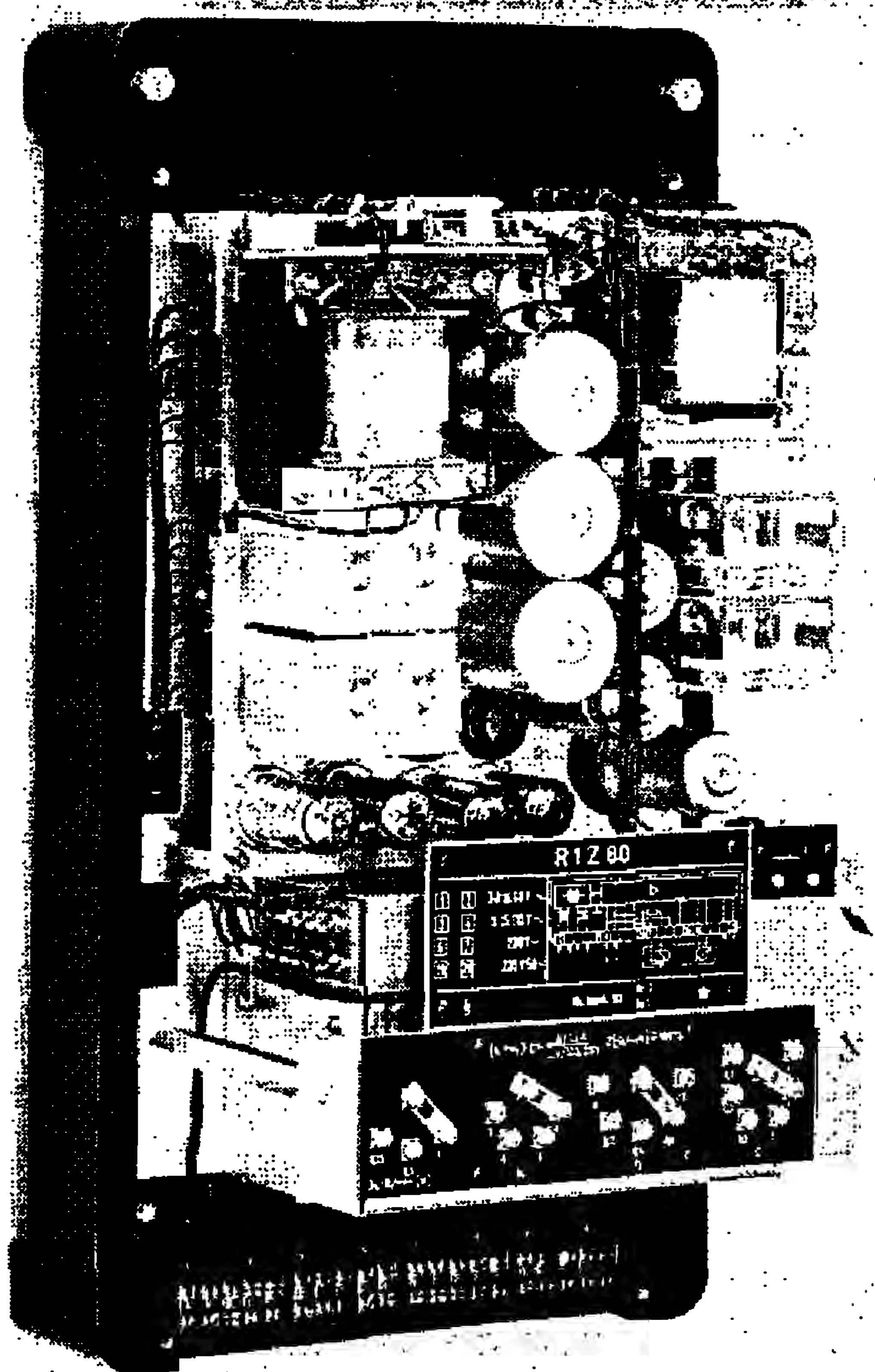
Информация о расстоянии до места короткого замыкания является в определенной степени побочным продуктом цифровой дистанционной защиты. Эта информация необходима для быстрого установления места повреждения и восстановления питания потребителя.

Вычисление расстояния до места замыкания производится с помощью измеренных и сохранённых в памяти мгновенных значений электрических величин при КЗ.

Интервал измерений автоматически устанавливается так, что его начало определяется моментом возникновения замыкания, а конец соответствует моменту, предшествующему отключению выключателя. Таким образом, гарантируется использование для расчёта только величин, соответствующих режиму КЗ (рис. 3.54).

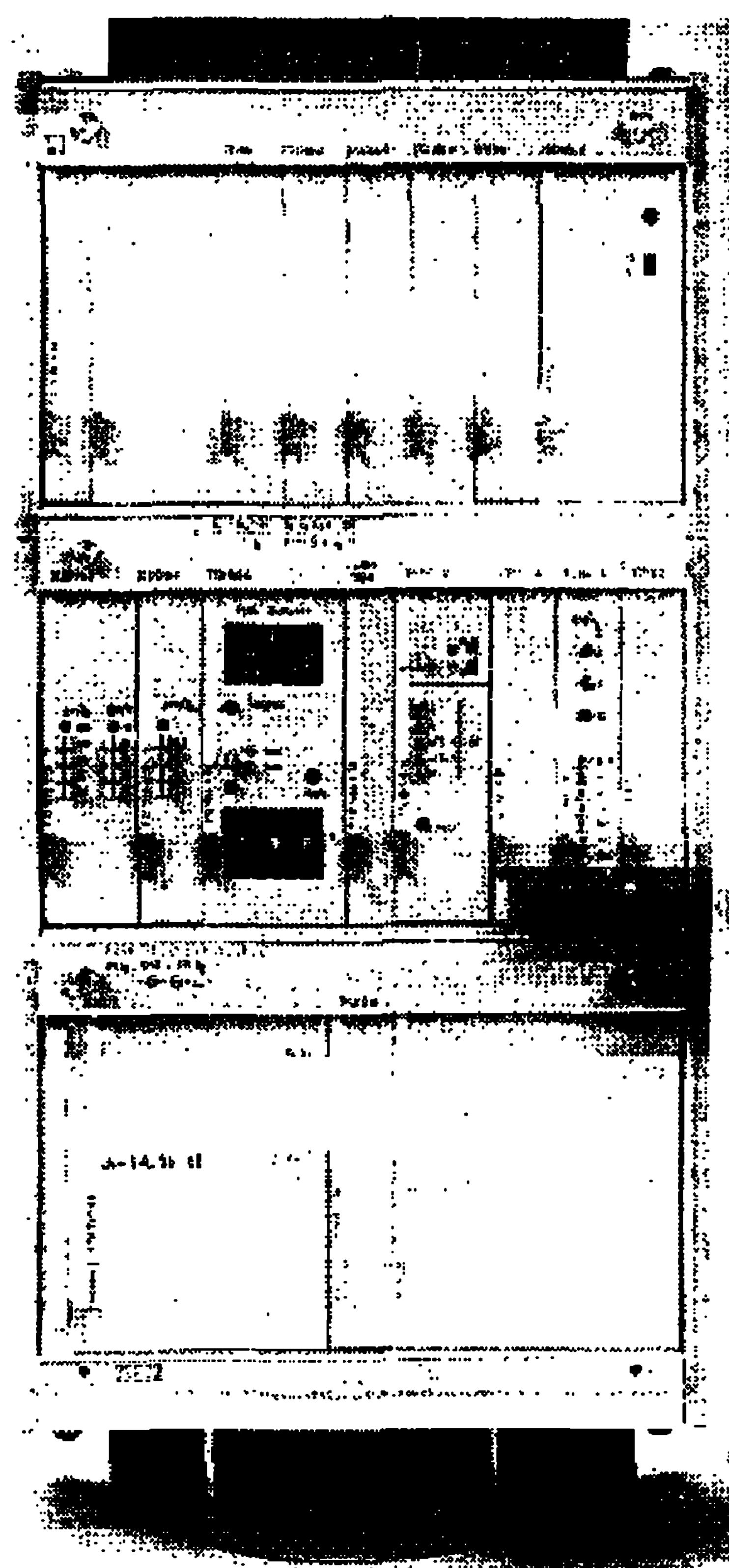
По сравнению с функцией дистанционной защиты (минимальное время измерения 10 мс), устройство для определения расстояния до места короткого замыкания может иметь значительно более длительный период снятия данных, состоящий из времени срабатывания защиты и времени отключения выключателя (минимально около 50 мс).

Поэтому, возможно повышение точности с помощью цифровой фильтрации и компенсации (учёта) переходного процесса при замыкании.



Электромеханическое устройство 7SE90 (R1Z80)

Расчетная формула $Z_{КЗ} = \frac{|\hat{U}_{КЗ}|}{|\hat{I}_{КЗ}|}$



Статистическое устройство 7SE72 с арифметическим процессором

Расчетная формула: $X_{КЗ} = \frac{|\hat{U}_{КЗ}|}{|\hat{I}_{КЗ}|} \cdot \sin\varphi_{КЗ}$

Рис. 3.53. Традиционные дистанционные органы для определения расстояния до места замыкания

Погрешность определения расстояния до места повреждения относительно всей длины линии менее 2,5 %. (7SA5/7SA6)

Расстояние до места замыкания может быть представлено либо длиной в км, либо сопротивлением (*X*, *R*). Более того, расстояние до места замыкания может рассчитываться сразу после срабатывания пускового органа защиты, либо только при появлении команды на отключение.

В разветвлённых сетях с необходимой точностью расстояние до места повреждения определяется только на повреждённой линии (расстояние определяется при появлении сигнала на отключение)

На последовательных участках вышерасположенные устройства также измеряют расстояния от места своей установки до точки КЗ (уставка: определение расстояния при срабатывании ПО).

В распределительных сетях с отходящими радиальными линиями одно и то же измеренное значение расстояния может относиться сразу к нескольким возможным

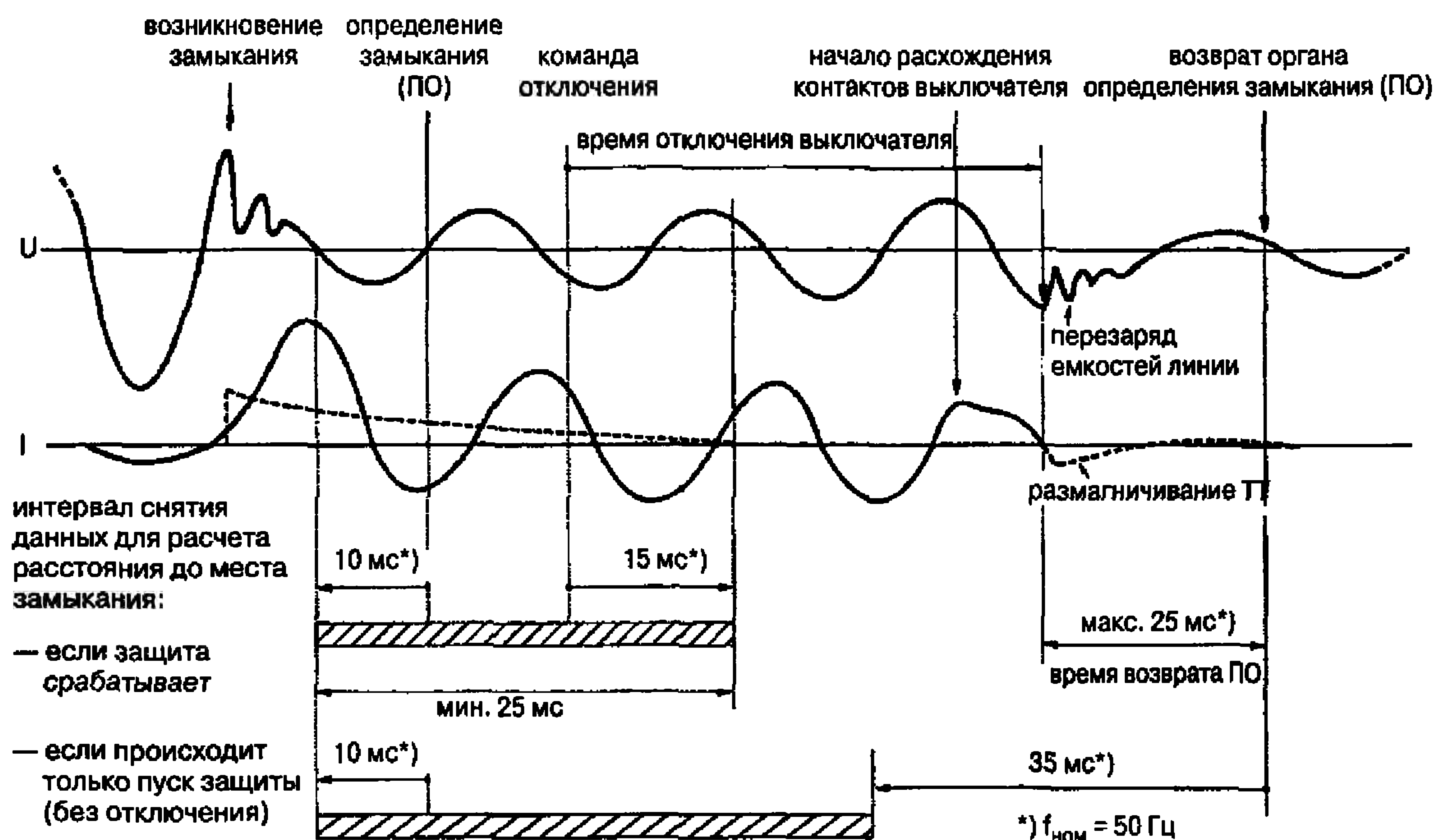


Рис. 3.54. Положение интервала снятия данных для определения расстояния до места замыкания

точкам короткого замыкания (рис. 3.55). Для определения поврежденного фидера необходимо использовать дополнительную информацию (например, сигнализация срабатывания защиты при КЗ), либо все возможные точки КЗ должны проверяться одна за другой.

При расчете расстояния до места повреждения при замыканиях на землю *на параллельных воздушных линиях* большое влияние оказывает сопротивление нулевой последовательности системы.

Это влияние может быть скомпенсировано использованием тока нулевой последовательности параллельной линии. Это более детально рассмотрено в п.п. 3.5.3.

На нагруженных линиях возникает фазовый сдвиг переходного сопротивления, обусловленный подпиткой от удалённого источника питания. Появляющаяся ложная реактивная составляющая вызывает положительную, либо отрицательную, в зависимости от направления протекания мощности, ошибку определения расстояния. [с 3.13 до 3.17]. Это явление и методы его компенсации подробно рассмотрены в п.п. 3.5.1.

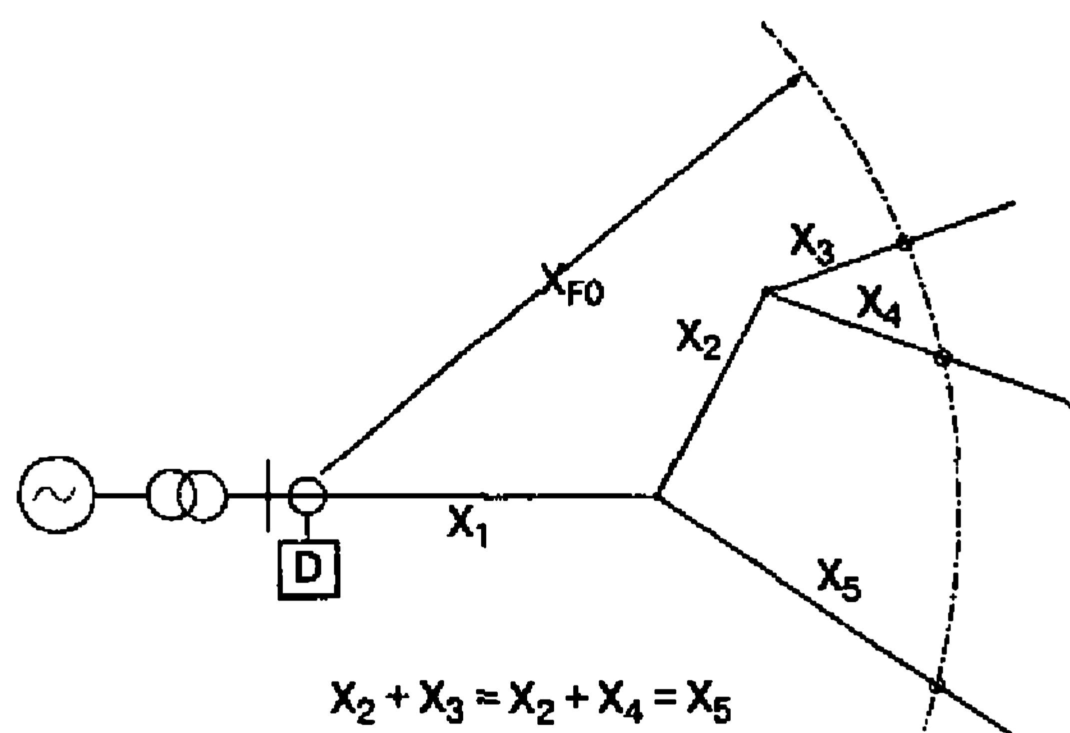


Рис. 3.55. Возможные точки замыкания при определении расстояния до места повреждения в распределительных сетях

Точное определение расстояния до места короткого замыкания на Т-образных линиях, либо при наличии на линии промежуточного источника питания, практически невозможно, если в устройстве используются данные, измеренные только на одном из концов линии. Те же самые факторы, как и при дистанционных измерениях, необходимо учитывать и здесь (см. п.п. 3.5.2).

Двухсторонние методы определения места повреждения

Точность измерения расстояния до места повреждения может быть значительно повышена использованием синхронизованных векторов тока и напряжения с обоих концов линии. Это позволяет практически устранить влияние нагрузки линии [3.14 до 3.17].

Для этого данные цифровых фиксирующих приборов централизованно собираются и обрабатываются на центральном компьютере или PC. Программа SIGRA для анализа аварийных режимов фирмы Siemens даёт такую возможность [3.18]. При использовании схем телезащиты с цифровыми каналами, синхронизации между концами и быстрого обмена данными о векторах возможны двухсторонние методы определения места повреждения, интегрированные в само устройство защиты.

На рис. 3.56 представлен принцип нового метода, который недавно был внедрён в устройства дифференциальной и дистанционной защиты (7SA6,7SD6).

U_1, I_1, U_2 и I_2 — измеренные синхронизованные вектора тока и напряжения двух терминалов. $U_П = (I_1 + I_2)\,R_П$ — напряжение на переходном сопротивлении $R_П$ в точке x, которую необходимо определить.

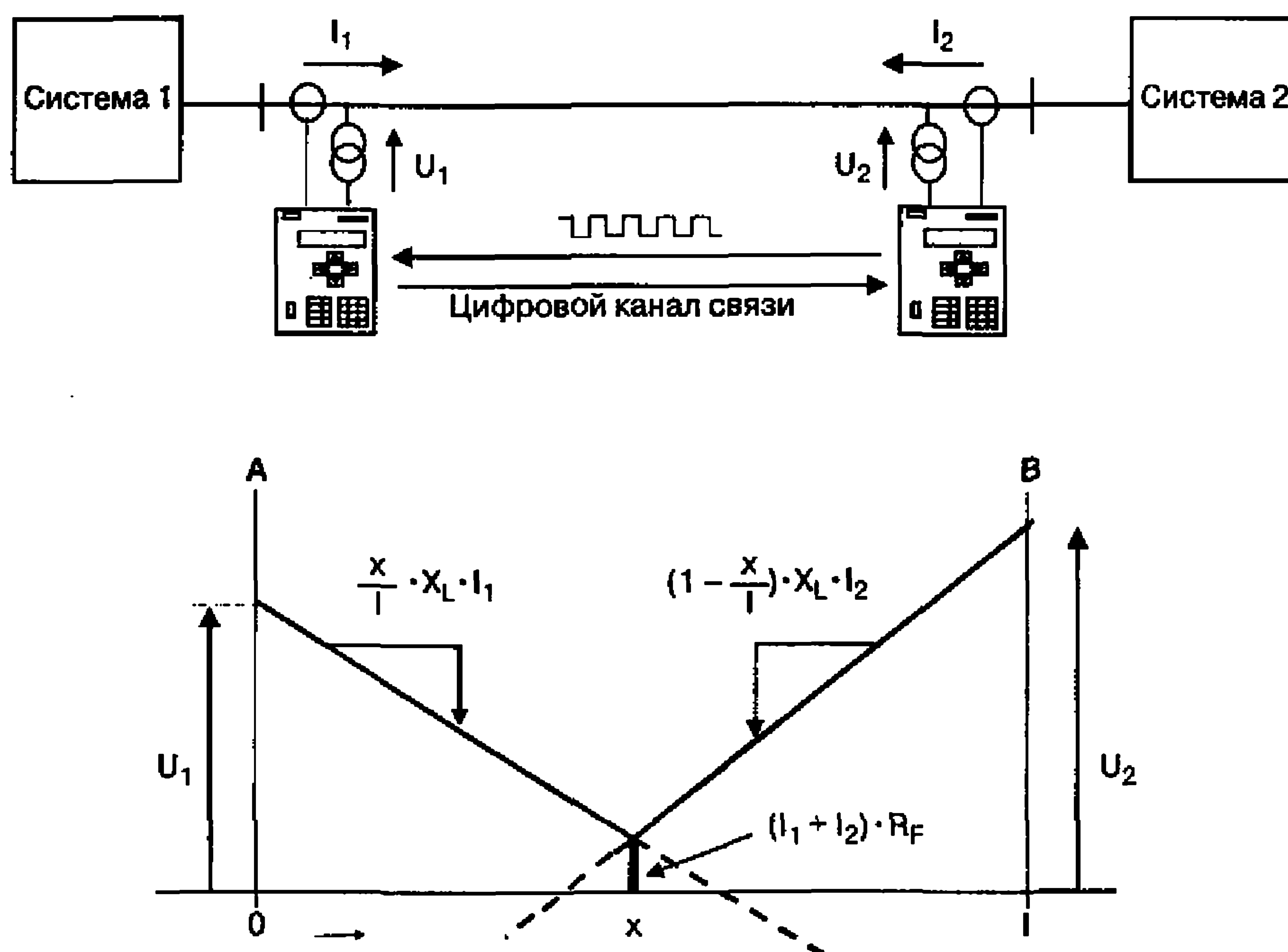


Рис. 3.56. Принцип определения расстояния от места повреждения (ОМП) с использованием информации с противоположного конца линии

Пренебрегая ёмкостью линии, мы получаем следующие выражения для двух линейных терминалов:

$$U_1 = \frac{x}{l}\underline{Z}_L \cdot I_1 + \underline{U}_П; \qquad (3.11)$$

$$U_2 = \left(1 - \frac{x}{l}\right)\underline{Z}_L \cdot I_2 + \underline{U}_П. \qquad (3.12)$$

Вычитая из одного выражения другое, мы можем избавиться от $U_П$, получив следующее выражение:

$$\frac{x}{l} = \frac{(\underline{U}_1 - \underline{U}_2)/\underline{Z}_L + I_2}{I_1 + I_2}. \qquad (3.13)$$

В действительности измеренные токи и напряжения обоих концов линии справедливы для линии с распределёнными параметрами, и место повреждения определяется итерационным путем с помощью метода наименьших квадратов [3.19].

Используются только составляющие прямой последовательности, поскольку только они присутствуют при всех видах КЗ.

Таким образом, этот метод имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами:

— отсутствует погрешность, обусловленная неточностью определения коэффициентов компенсации тока в земле;

— отсутствует погрешность, обусловленная переходным сопротивлением даже на длинных сильно нагруженных линиях;

— отсутствует погрешность, обусловленная взаимоиндукцией;

— уменьшается влияние несимметрии линии.

Разработаны и другие методы ОМП, частично используемые на практике [3.20]

3.1.14. Ступенчатая диаграмма

Согласование защищаемых зон и выдержек времени дистанционной защиты может быть представлено на так называемой ступенчатой диаграмме. [3.21]

Радиальные линии (ответвления)

Наиболее простым случаем являются *одиночные линии с односторонним питанием* (рис. 3.57).

Для обеспечения селективного действия защит смежных участков необходимо

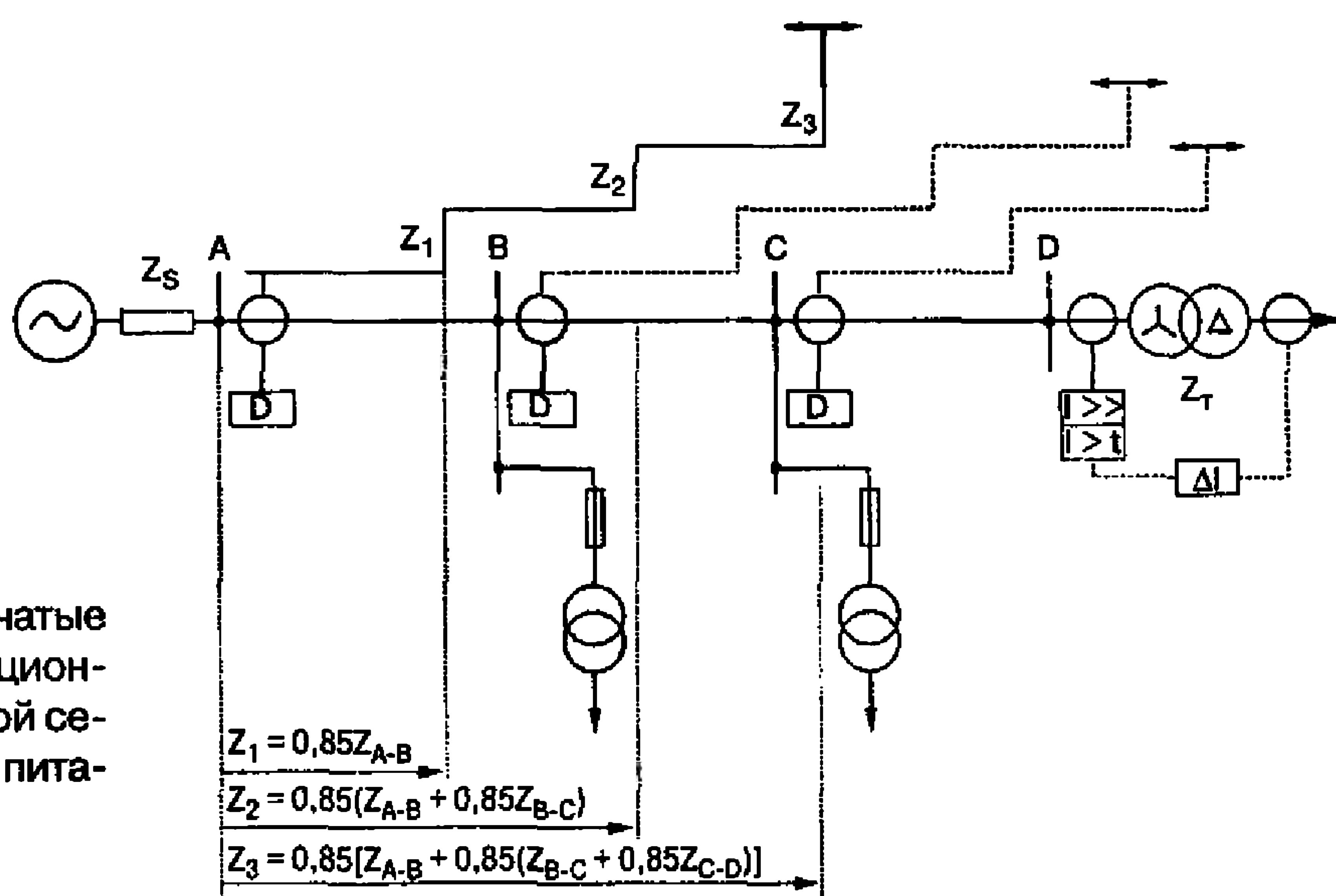


Рис. 3.57. Ступенчатые диаграммы дистанционных защит радиальной сети с односторонним питанием

согласование их параметров срабатывания: сопротивлений (защищаемых зон) и выдержек времени срабатывания.

Различие сопротивлений срабатывания смежных участков характеризуется коэффициентом ступени (коэффициентом отстройки). Для определения уставки зоны (ступени) расстояние (сопротивление) до смежной зоны (участка) умножается на коэффициент отстройки.

Поэтому для получения 15 % запаса, необходимо использовать коэффициент 0,85. Этот коэффициент учитывает погрешности измерений, погрешности измерительных трансформаторов тока и напряжения и неточность задания параметров линии.

Обычно используются следующие коэффициенты:

- 0,80: для электромеханической защиты;
- 0,85: для статических и цифровых защит, или для электромеханических защит, если параметры линии измеряются;
- 0,9: для статических и цифровых защит, если параметры линии измеряются.

Эти уставки учитывают то, что предел досягаемости не бесконечен, т. е. защищаемая зона ограничена.

Более того, при использовании, например, электромеханической защиты время отключения по мере приближения к концу линии постоянно увеличивается (рис. 3.58).

При расчётах зон дистанционной защиты в первую очередь определяется уставка I ступени. Она определяется с учётом длины защищаемого участка. Уставка второй ступени отстраивается относительно I ступени защиты смежного участка. Аналогично, уставка III ступени отстраивается от конца зоны, защищаемой II ступенью смежного участка.

Для того, чтобы обеспечить резервную защиту шин приёмной подстанции (особенно, если на ней не предусмотрена защита шин), уставка 2-ой ступени должна, по крайней мере, на 20 % превышать сопротивление защищаемой линии. Это не всегда возможно, например, если за длинной воздушной линией следует короткий кабель (электроснабжение городских потребителей: рис. 3.59). В этом случае, уставка выдержки времени ступени 2 должна быть увеличена, если не применяются особые меры. Например, возможно использование обратно направленной ступени дистанционной защиты на удалённой подстанции для обеспечения надежного отключения замыканий на шинах. Зона защиты 3-ей ступени должна быть как можно длиннее. Если смежная линия короткая, то появляется та же проблема, что и для 2 ступени.

Пусковая ступень (определение повреждения) должна быть как можно более чувствительной, и её зона срабатывания

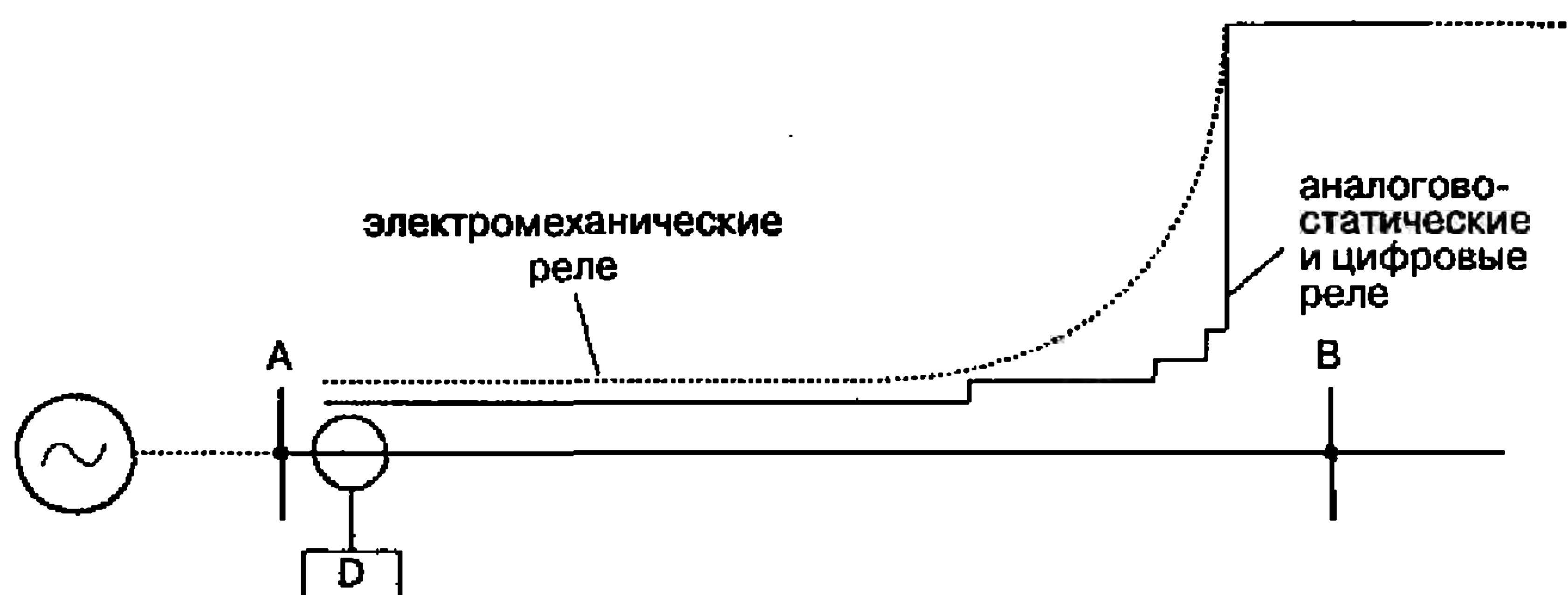


Рис. 3.58. Увеличение времени отключения при приближении к концу зоны защиты

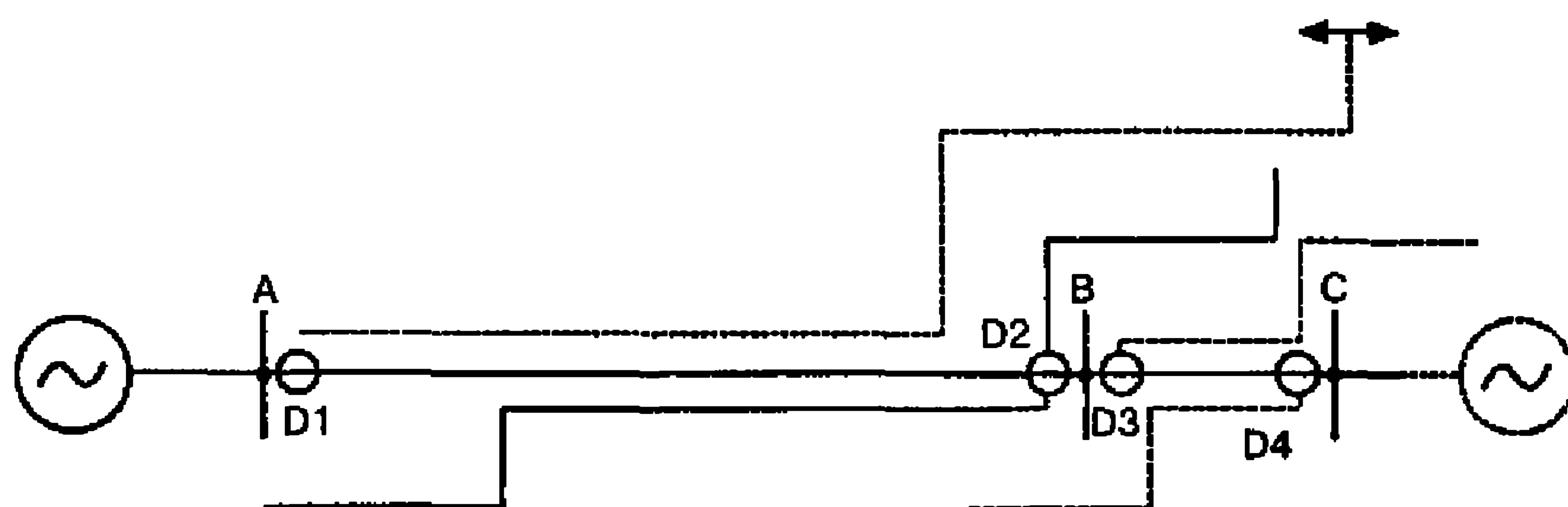


Рис. 3.59. Использование обратнонаправленной ступени в защите D2

должна быть больше зоны, защищаемой 3-ей ступенью. Она должна охватывать наиболее длинную смежную линию, включая последующие шины. Тем самым гарантируется, что в случае отказа защиты или выключателя удалённое повреждение будет отключено с наибольшей выдержкой времени (в разветвленных сетях осуществить это сложно, т. к. промежуточная подпитка сокращает зону досягаемости реле).

Выбор уставок выдержек времени должен осуществляться по следующим критериям:

1-ая ступень. Время срабатывания не включает в себя каких-либо дополнительных уставок, т. е. равно времени срабатывания измерительных органов. Выдержка времени T_1 используется только в исключительных случаях.

Время срабатывания защиты зависит от типа реле:

Механическая защита

— для линий среднего и высокого напряжения (R1KZ4, R1KZ7, R1Z23)	60—80 мс
— для линий сверхвысокого напряжения (R3Z27)	25—40 мс

Статическая защита (аналогово-электронная)

— для среднего напряжения (7SL17, 7SL70)	35—45 мс
— для высокого напряжения (7SL24, 7SL73)	25—35 мс
— для сверхвысокого напряжения (7SL31, 7SL32)	15—30 мс

Цифровая защита

— для среднего и высокого напряжения (7SA511, 7SA6xx)	20—30 мс
— для сверхвысокого напряжения (7SA6xx, 7SA522)	15—25 мс

2-ая ступень. Она должна позволить сработать 1-ым ступеням защит на соседних линиях. Поэтому уставка выдержки времени определяется суммированием следующих составляющих:

- время срабатывания первых ступеней на соседних линиях;
- время отключения выключателя на соседней линии (время с момента появления команды на отключение от защиты до исчезновения тока короткого замыкания) — от 40 мс (2 периода) на линиях сверхвысокого напряжения, до, приблизительно, 80 мс на линиях среднего напряжения;
- время возврата дистанционной защиты — Из-за инерции возврат пускового органа, выявляющего повреждения, не происходит мгновенно после исчезновения тока. Он остаётся в сработанном состоянии в течение некоторого времени (время возврата). Для электромеханических защит это время составляет от 60 до 100 мс, для статических защит — приблизительно 30 мс и для цифровых защит — приблизительно 20 мс;
- погрешности внутренних элементов выдержек времени дистанционной защиты

(механические — 5 % от уставки, минимально 60—100 мс
статические — 3 % от уставки, минимально 10 мс
цифровые — 1 % от уставки, минимально 10 мс).

Время срабатывания пускового органа дистанционной защиты
учитывается (вычитается), только если запуск внутренних элементов выдержек времени защиты осуществляется после срабатывания пусковой ступени для всех дистанционных защит «Siemens».

(механические —
— при токовом пуске: 10 мс,
— при комбинированном пуске: 25 мс
статические —
— при токовом пуске: 5 мс,
— при комбинированном пуске: 25 мс
цифровые — обычно: 15 мс).

(В защитах других производителей установленные выдержки времени могут отсчитываться от момента возникновения замыкания, и тогда время срабатывания пусковой ступени дистанционной защиты не должно учитываться)

Время запаса
зависит от типа или элементной базы согласуемых защит

(механические—механические: 100 мс
статические/цифровые—механические или наоборот: 75 мс
цифровые/цифровые или статические—статические: 50 м)

3-я ступень: уставки зависят от тех же факторов, что и уставки выдержек времени 2-ой ступени, и рассчитываются относительно выдержки времени 2-ой ступени защиты на смежной линии (время пуска + + установленная выдержка времени + + время до появления сигнала на отключение, приблизительно 10 мс)

Направленная ступень с выдержкой времени (пусковая) — эта ступень (на диаграмме обозначена →) состоит из пускового органа и органа определения замыкания в прямом направлении, объединённых по схеме И. Это направленная резервная защита для очень удалённых замыканий. Выдержка времени на ступень селективности больше, чем для ступени 3. Расчёт аналогичен расчёту выдержки времени ступени 3.

Ненаправленная ступень с выдержкой времени (пусковая): эта ступень производит отключение с выдержкой времени при определении замыкания, т. е. при срабатывании ПО. Является последней («финальной») резервной ступенью. Выдержка времени на одну ступень больше, чем выдержка времени направленной ступени.

Ступенчатые диаграммы выдержек времени направленных защит

На линиях с двусторонним питанием или в кольцевой сети расчёты выдержек времени должны производиться независимо для каждого направления (рис. 3.60). Это возможно, если все ступени дистанционной защиты направленные и имеется направленная пусковая ступень с выдержкой времени. Поскольку срабатывание ненаправленной пусковой ступени происходит при токах, протекающих в обоих направлениях, то она не обеспечивает селективного отключения.

Её применение возможно в качестве самой последней резервной ступени с выдержкой времени больше, чем выдержка времени последней (пусковой) направленной ступени.

Как показано, использование на радиальных линиях ступеней с обратно-на-

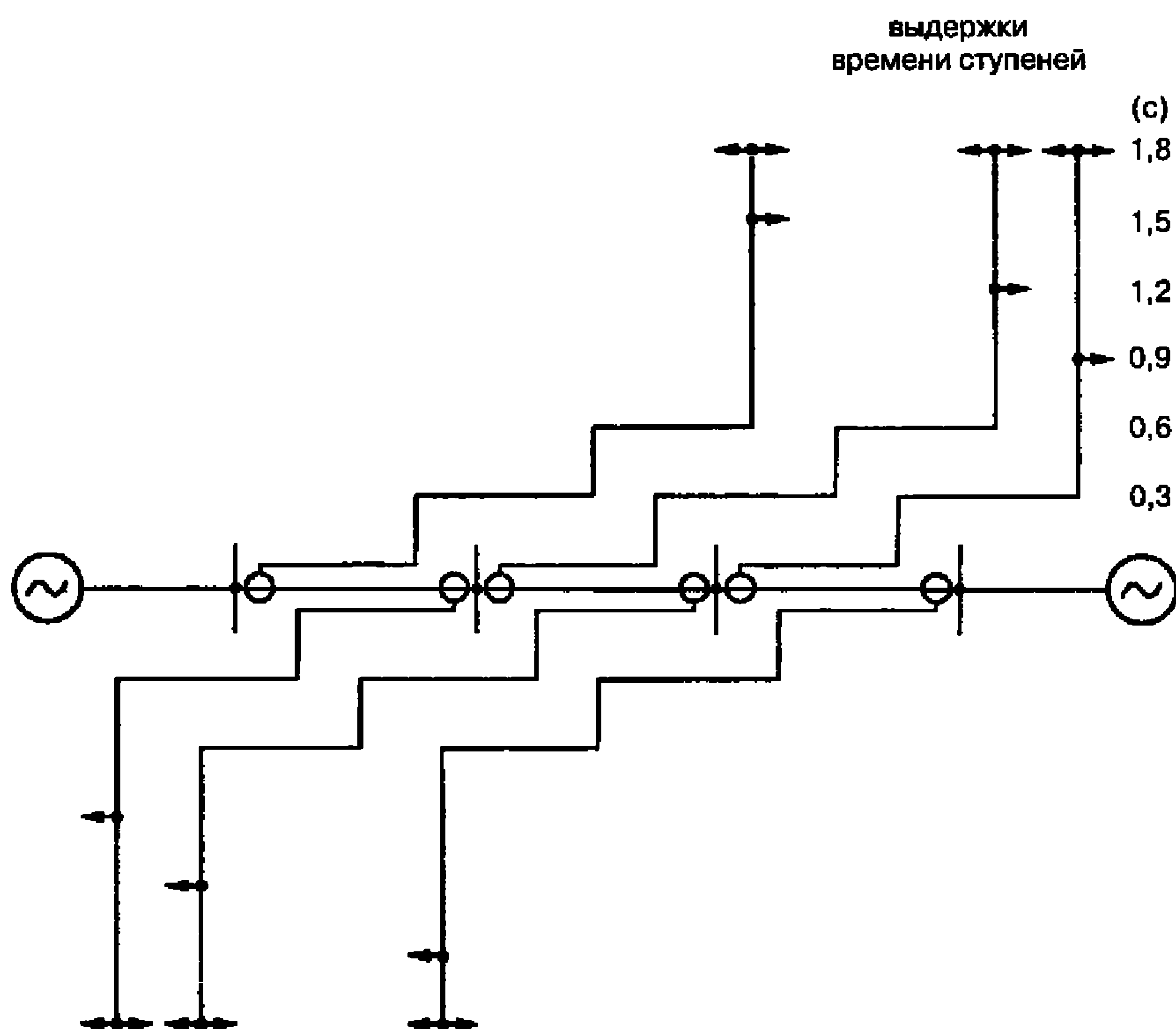


Рис. 3.60. Ступенчатые диаграммы в сети с двухсторонним питанием

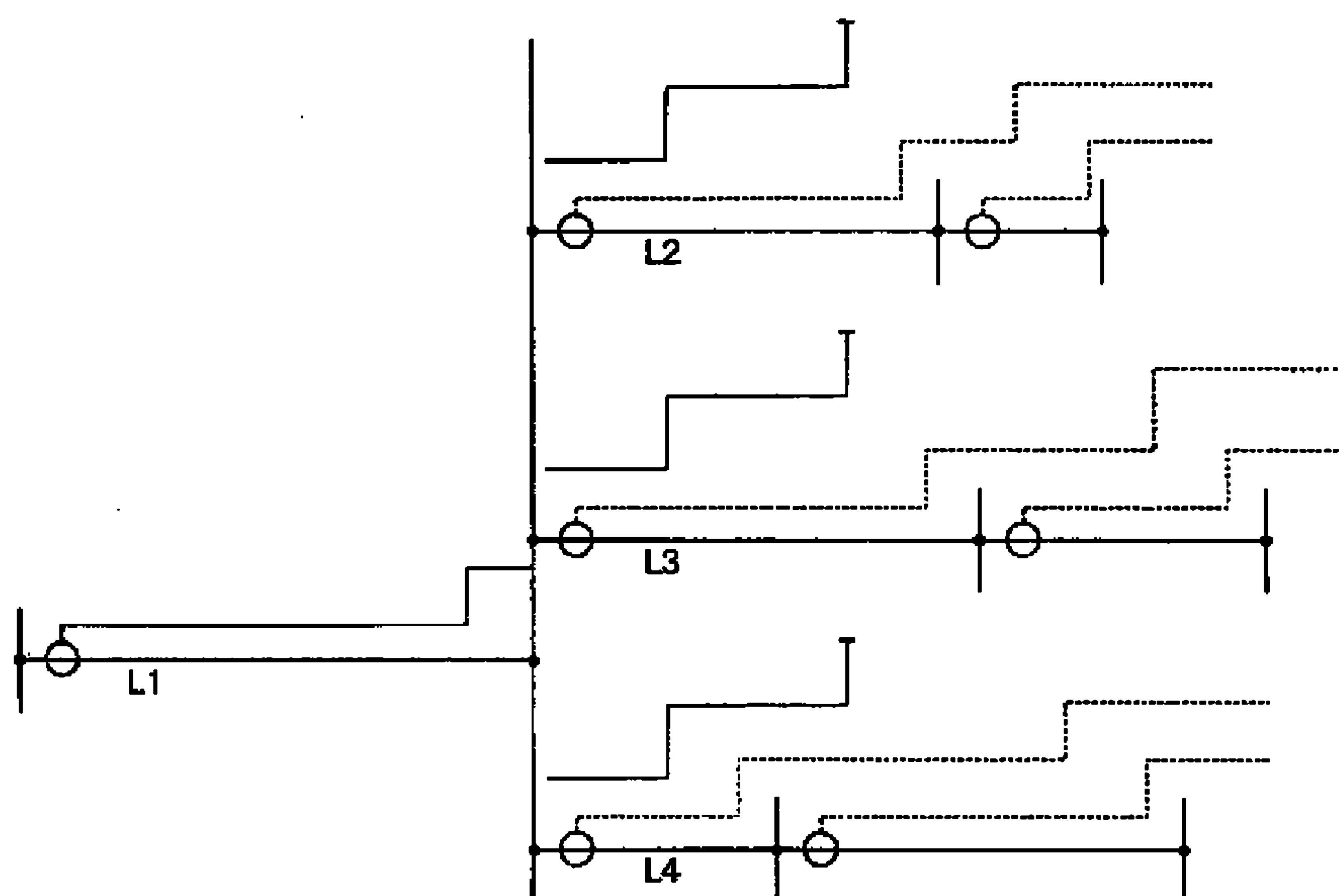


Рис. 3.61. Расположение ступеней защиты в разветвленных радиальных сетях

правленными защищаемыми зонами может иметь определенные преимущества.

Ступенчатые диаграммы защит в разветвлённых радиальных системах

Если к шинам удалённой подстанции присоединено несколько линий, то уставки второй зоны (ступени) должны быть согласованы с уставкой 1-ой ступени самой короткой из них (рис. 3.61). На представленном рис. таковой является ступень 1 на линии 4. Уставки 3-ей ступени зависят от минимальной из уставок 2-ых ступеней смежных линий (ступень 2 на линии 2).

Ступенчатые диаграммы защит для параллельных линий

В случае замыкания на одной из параллельных линий сопротивление, измеряемое при замыкании, уменьшается. Это представлено на рис. 3.62. При возникновении замыкания на линии 2 на расстоянии X от подстанции B, реле D1 на подстанции A измеряет соответствующее сопротивление, определяемой параболической кривой, представленной на рис. 3.62.

Параболическая кривая получается из-за параллельного соединения сопротив-

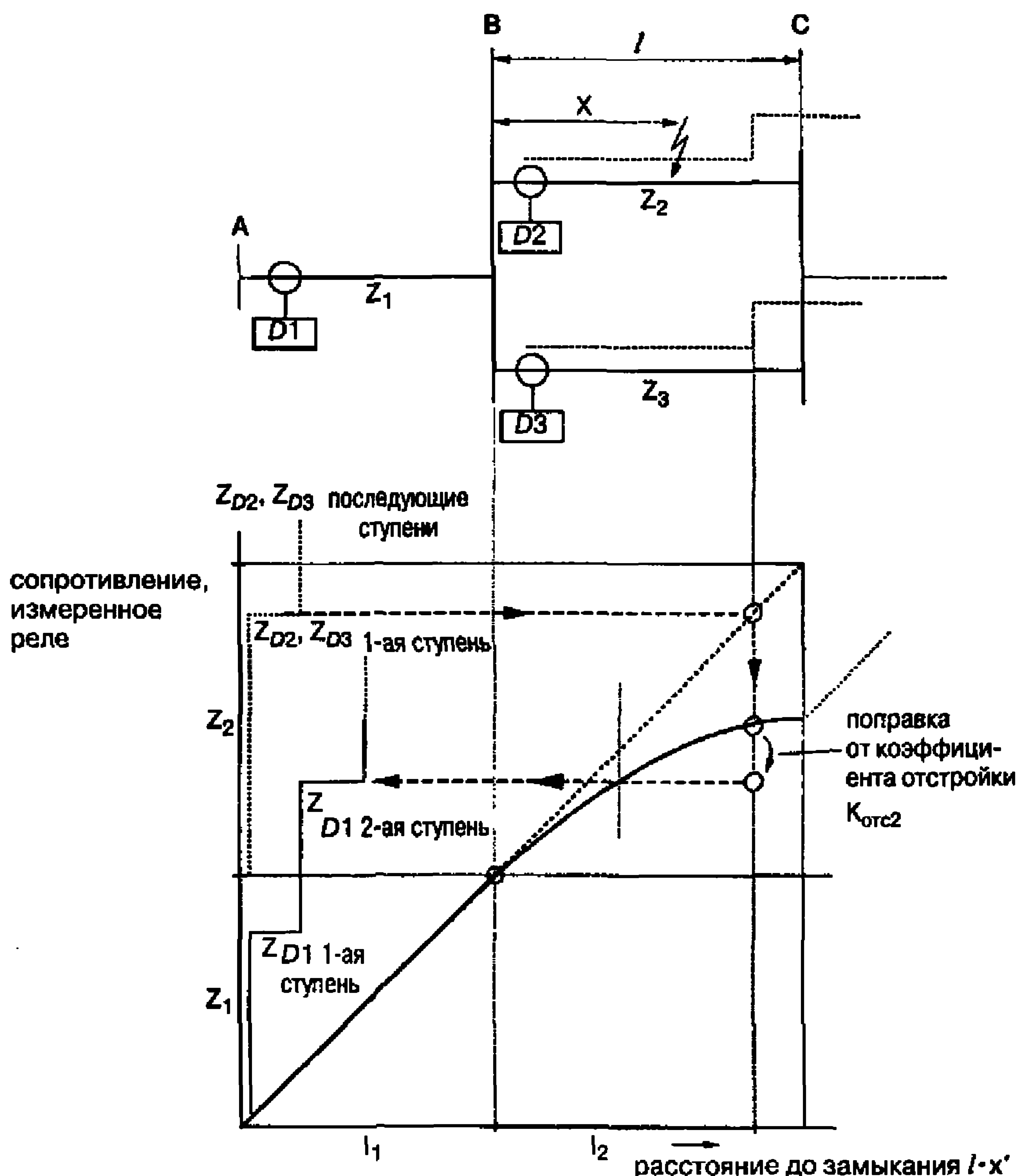


Рис. 3.62. Ступенчатые характеристики защит параллельных линиях

лений $\frac{x}{l} \cdot Z_2$ и $Z_3 + \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot Z_2$. Если $x = l$, то при равенстве $Z_2 = Z_3$ эквивалентное сопротивление линии уменьшается в 2 раза.

Строго говоря, для определения уставки 2 ступени защиты D1 необходимо рассчитать сопротивление, соответствующее концу зоны действия I ступени защиты линий 2 и 3 с учётом приведённых соотношений. Уставка определяется умножением полученного значения на соответствующий коэффициент отстройки.

$$Z_{D1,2} = K_{отс2}\left\{Z_1 + \frac{[Z_3 + (1 - K_{отс1})Z_2]K_{отс1} \cdot Z_2}{Z_1 + Z_3}\right\}, \quad (3.14)$$

где $K_{отс1}$ — коэффициент отстройки для первой ступени защит D1 и D2, а $K_{отс2}$ — для второй ступени защиты D1.

При равенстве сопротивлений $Z_2 = Z_3$ уставка 2 ступени защиты D1 определяется следующим соотношением:

$$\underline{Z}_{D1,2} = K_{отс2} \cdot (\underline{Z}_1 + 0{,}5 \cdot \underline{Z}_2) \quad (3.15)$$

Влияние промежуточной подпитки

Наличие подпитки между местом установки защиты и точкой КЗ влияет на значение измеренного сопротивления. Сопротивление увеличивается, т. е. защита «рассматривает» замыкание, как более удалённое, чем есть на самом деле, и может отключить его только ступенями с большими защищаемыми зонами. Этот эффект возникает потому, что ток подпитки вызывает дополнительное падение напряжения в петле КЗ. Это вызывает повышение напряжения в месте установки защиты и уменьшение защищаемой зоны (рис. 3.63). Величина ошибки пропорциональна отношению тока подпитки к току в месте установки реле, т. е. чем больше ток подпитки, тем больше ошибка.

Выбор коэффициента отстройки должен производиться для каждого конкретного случая в соответствии с практическими условиями работы системы, и часто зависит от личного мнения проектировщика.

Применяются следующие способы учёта влияния подпитки:

- Ступень1

Здесь промежуточная подпитка играет роль только на Т-образных линиях или на линиях с ответвлениями. Это более подробно описано в п.п. 3.5.2.

- Ступень 2

Уставка рассчитывается без учёта промежуточной подпитки. Это гарантирует *селективность в любых условиях.* Это является разумной мерой в любом случае, т. к. замыкание близкое к концу линии всегда должно отключаться ступенью 2 и ни при каких условиях не должна срабатывать выше расположенная защита. Зона защиты 2-ой ступени должна охватывать защищаемую линию с запасом, по крайней мере, в 20 % её длины, и являться резервной защитой для шин удалённой подстанции. Если существует несколько источников промежуточной подпитки, которые сокращают зону защиты, то возможен компромисс. Можно считать, что, по крайней мере, часть этих подпиток всегда подсоединена.

В разветвлённых системах это может привести к тому, что зоны защищаемые 2-ыми ступенями, будут относительно короткими с большими выдержками времени срабатывания при отказе защит или выключателей.

- Ступень 3

Вариант 1: Промежуточные подпитки принимаются во внимание:

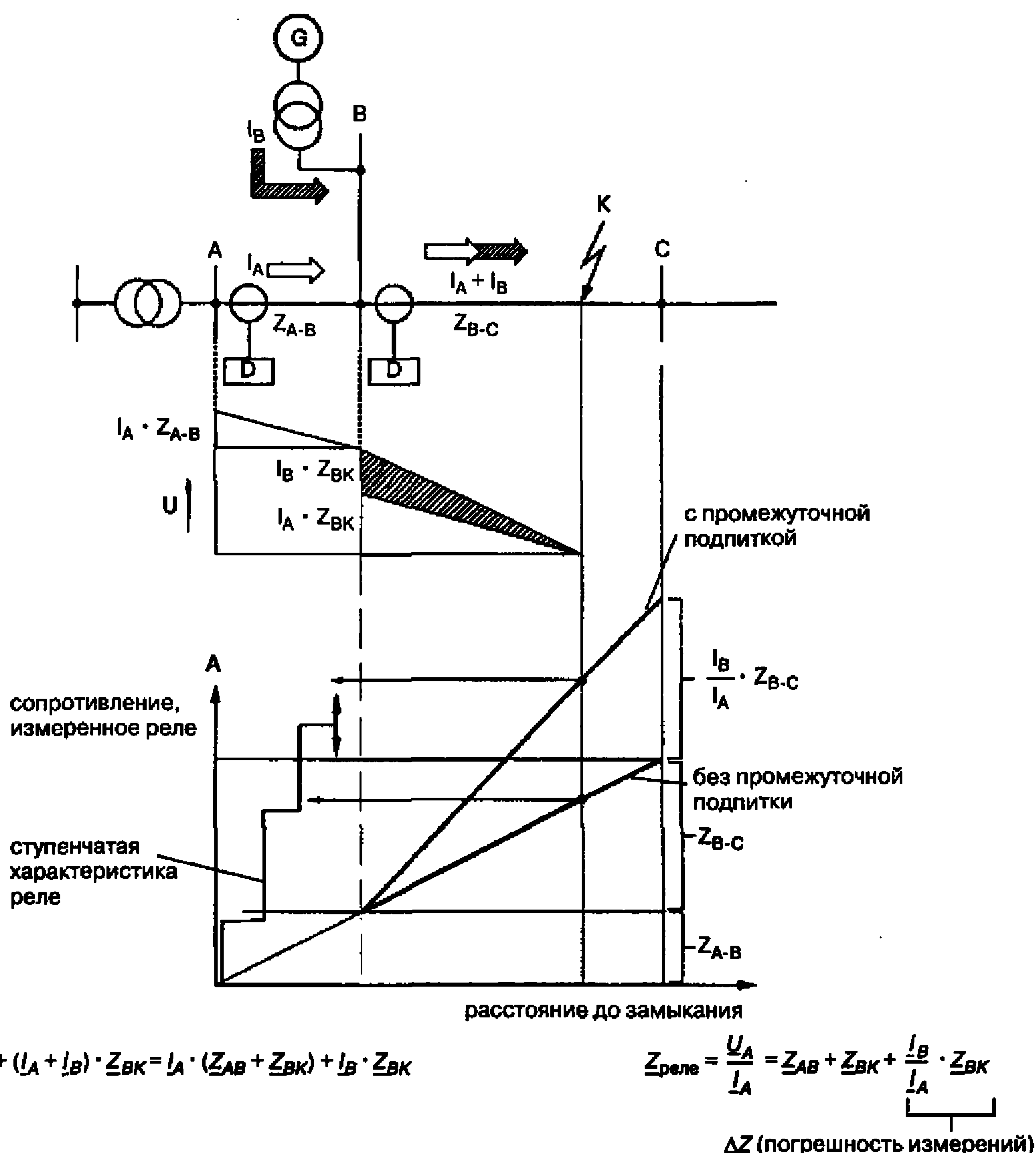


Рис. 3.63. Влияние промежуточной подпитки на измерение расстояния

Этим достигается большая зона охвата 3-их ступеней. Однако, при отключении промежуточных источников 3-и ступени не всегда будут селективными. Больших выдержек времени 4-ой и 5-ой ступеней при дистанционном пуске стараются избегать. Если к шинам подстанции подключено несколько промежуточных источников питания, то может быть принято компромиссное решение: например, считать, что только 2 из 3 источников питания постоянно подсоединены.

Вариант 2: Промежуточные источники питания не принимаются во внимание:

Обычно зоны 3-их ступеней защиты в разветвлённых системах получаются очень короткими. Это означает, что при отказе выключателя или защиты, замыка-

ния часто отключаются с выдержкой времени пусковой ступенью. В этом случае должна быть обеспечена селективность использованием ступенчатых выдержек времени пусковых ступеней для того, чтобы избежать частых неуправляемых отключений и перерывов питания. Более того, должны использоваться более длительные выдержки времени.

- Пусковая ступень (определение замыкания)

  Пусковая ступень должна быть как можно более чувствительной.

  В разветвлённых системах использование дальнего резервирования часто сопряжено с трудноразрешимыми проблемами. Из-за наличия промежуточных подпиток определяемое защитой расстояние до места замыкания в большинстве случаев увеличивается по сравнению с фактическим, и может быть просто не «видно» пусковой ступени дистанционной зашиты, определяющей повреждение. Если из-за влияния промежуточной подпитки не возможен охват пусковой ступенью наиболее длинной смежной линии, то должна быть предусмотрена местная резервная защита (защита от отказа выключателя, УРОВ). Для защиты от замыкания на землю может быть использована дополнительная чувствительная токовая направленная защита нулевой последовательности. В Германии применяется токовая ступенчатая (с выдержкой времени) направленная защита от замыканий на землю с пуском по напряжению нулевой последовательности (например, она включена в 7SA513). В определённых случаях может быть выгодно, если мощность подпитки изменяется. Тогда по прежнему возможно распознавание и отключение замыкания защитой на линии с наиболее сильной подпиткой. *После ее отключения защиты на оставшихся участках* также могут определить замыкание и отключить его. В итоге происходит последовательное отключение с небольшими дополнительными выдержками времени.

Распределение ступеней защиты в разветвлённых системах

В разветвлённых системах оба описанных эффекта имеют место.

Параллельные пути протекания токов короткого замыкания могут вызвать увеличение защищаемой зоны, тогда как узлы с промежуточной подпиткой могут привести к ее уменьшению.

Это можно рассмотреть на простом примере двухцепной воздушной линии (рис. 3.64).

При возникновении замыкания в точке, которая находится в пределах зоны действия 1-ой ступени защиты D2, но может *находиться вне зоны 2 ступени защиты* D1, измеряемое D1 расстояние зависит от состояния выключателей на параллельных линиях. Для избежания излишнего охвата, должен использоваться коэффициент отстройки $K_{отс2}$ = 0,9 относительно наименьшего сопротивления. Оно соответствует параллельному включению линий на участке АВ и отключению одной из цепей на участке ВС (случай 5 на рис. 3.64). При этом влияние промежуточной подпитки не учитывается, а учитываются сопротивления параллельных контуров коротких замыканий.

На рис. 3.64 представлена зона охвата 2-ой ступени при определённом значении уставки и различных состояниях выключателей цепи. По оси Y отложены сопротивления, измеряемые реле и уставка, а по оси X расстояние до места замыкания, т.е. сопротивления линии, которые в то же самое время соответствуют физической дли-

не линии, т. к. в этом примере принято, что все линии имеют одинаковую геометрию и одинаковое удельное сопротивление.

Сопротивления при определённом расстоянии до места замыкания зависят от условий работы системы и отложены по оси Y.

На рис. 3.64 рассматривается замыкание, которое находится в пределах 1-ой ступени защиты D2. При этом, сопротивления, измеренные в месте установки защиты D2, могут быть легко получены.

Эта диаграмма также может быть использована для определения защищаемых зон путём нанесения линий параллельных горизонтальной оси. На рис. это показано

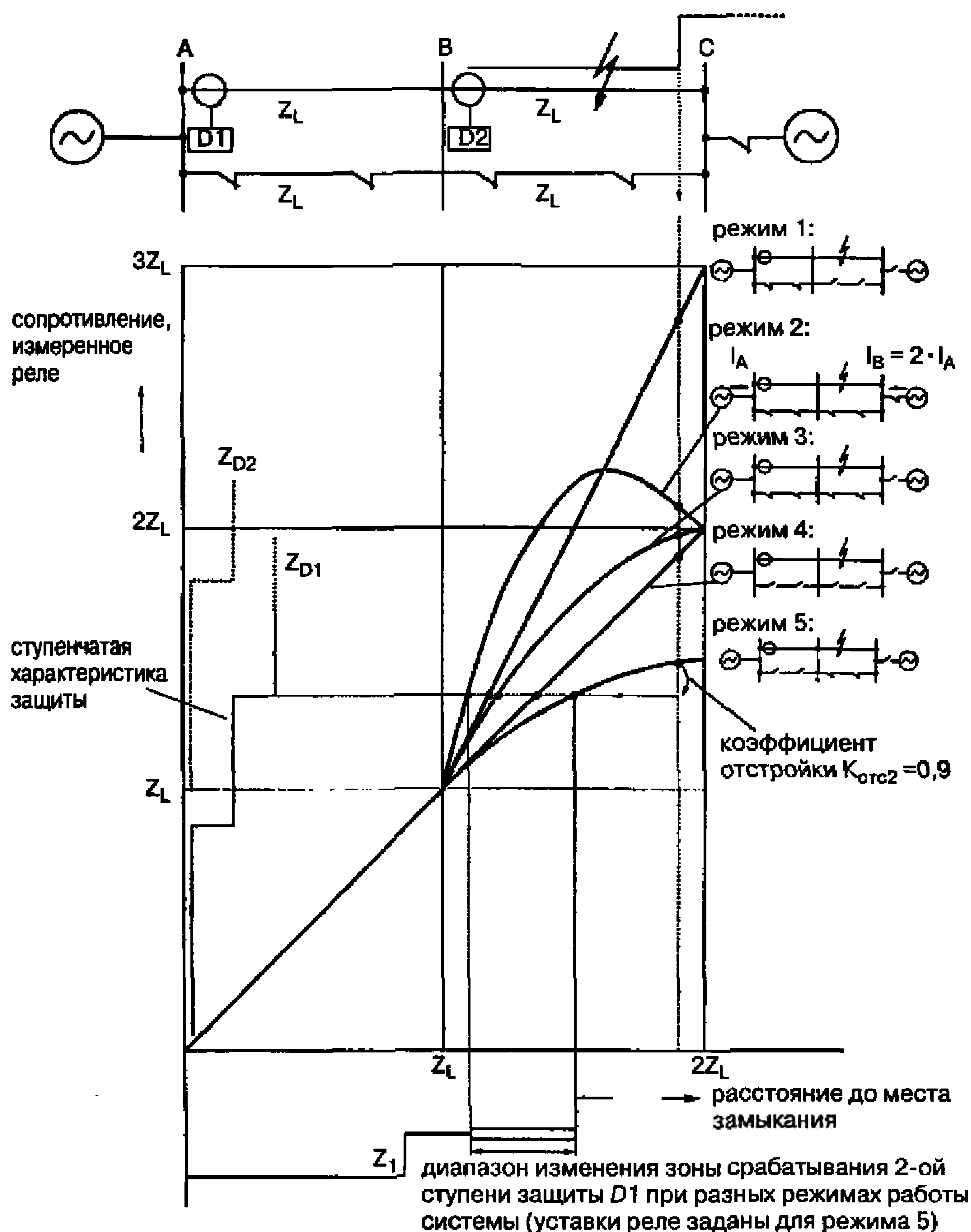


Рис. 3.64. Влияние режима системы на длину защищаемой зоны

для 2 ступени. Таким образом, легко определяется различие защищаемых зон при различных состояниях выключателей.

Аналогичным образом могут быть определены сопротивления, измеряемые реле при других режимах работы. Однако, в большинстве случаев, для расчетов защиты параллельных линий возможно использование половины сопротивления линии. Соответственно, при расчёте защиты трех линий, включенных параллельно, можно использовать 1/3 сопротивления линии.

Выбор выдержек времени пусковых ступеней

Расчет выдержек времени должен производиться по направлению от потребителя к питающему элементу аналогично расчёту выдержек времени максимальной токовой защиты.

На линиях с двусторонним питанием и в разветвлённых системах ступенчатый выбор имеет смысл только при наличии направленной пусковой ступени. Согласование ступеней при ненаправленном пуске невозможно. Выдержки времени ненаправленных пусковых ступеней обычно устанавливаются одинаковыми для всей системы одного напряжения. Эта выдержка времени на одну ступень больше выдержки времени самой медленнодействующей направленной ступени [3.22].

Программы для построения ступенчатых диаграмм

Для проектирования ступенчатой диаграммы возможно использование специальных программ.Для этих целей фирма «Siemens» предлагает программу DISTAL, которая является частью программы SINCAL, предназначенную для расчета режимов короткого замыкания и потокораспределения нагрузок. [3.24].

Программа автоматически создаёт ступенчатую диаграмму зон защиты в соответствии с установленным алгоритмом. Частные изменения могут быть внесены в диалоговом режиме. Определение диаграмм выдержек времени пусковых ступеней не включено в этот алгоритм, т. к. для этого требуется учёт специфических особенностей системы (электроснабжение больниц, промышленных заводов).

3.2. Цифровые дистанционные измерения

3.2.1. Определение контура замыкания

На рис. 3.65 представлена эквивалентная схема замещения повреждённого контура. Из неё могут быть получены со-

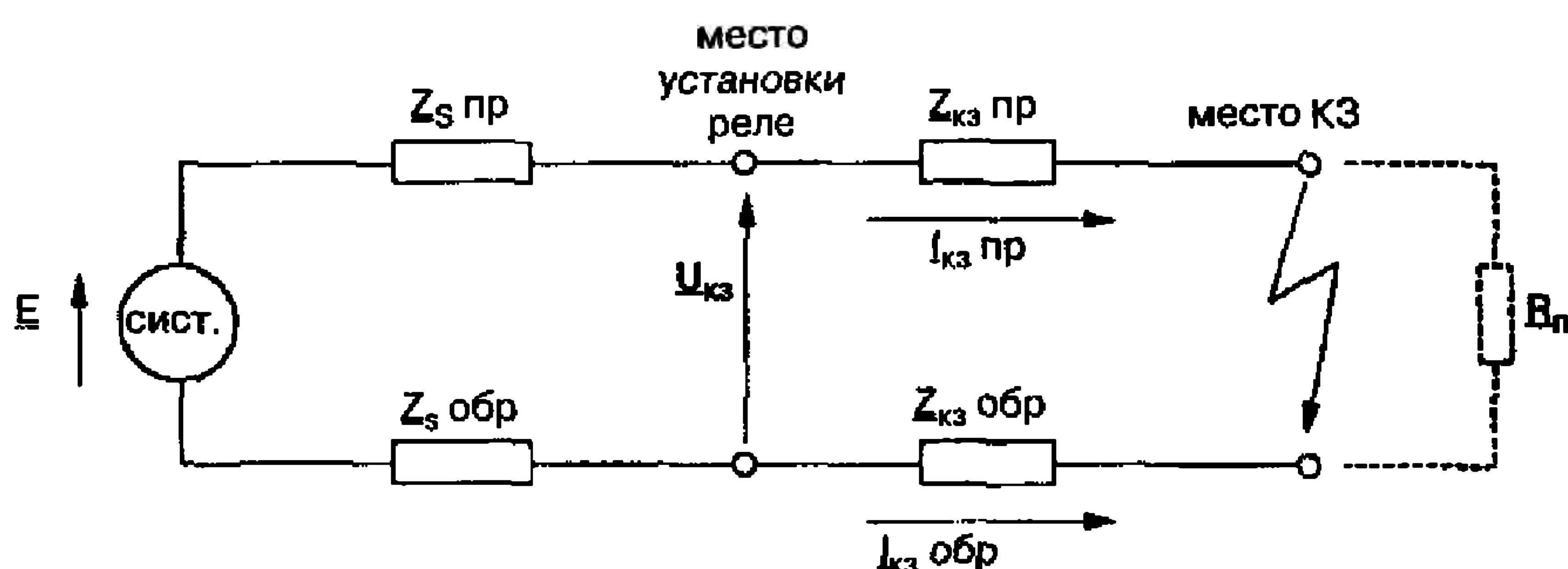


Рис. 3.65. Эквивалентная схема замещения поврежденного контура

ответствующие сигналы для дистанционных измерений.

На рис. 3.65 изображен участок сети с односторонним питанием места повреждения. Для рассматриваемой защиты схема действительна и при двустороннем питании, если переходное сопротивление $R_п$ в месте КЗ пренебрежимо мало. Это справедливо для большинства замыканий на кабельных линиях и на воздушных линиях со стальными опорами и нормальными условиями заземления. При больших значениях переходных сопротивлений $R_п$, на измерение расстояния оказывает влияние ток с противоположного конца, который протекает через место КЗ. Этот фактор более подробно рассмотрен в п.п. 3.5.1.

$\underline{E}$ — эквивалентная ЭДС, а $\underline{Z}_S$ — сопротивление источника питания. $Z_{КЗ} = Z'_{КЗ} \cdot l$ — сопротивление короткозамкнутого участка цепи, где $Z'_{КЗ}$ — удельное сопротивление линии, а l — расстояние до места повреждения; $\underline{Z}_S$ и $Z_{КЗ}$ определяются совокупностью полных сопротивлений прямого и обратного участков контура (петли КЗ).

$\underline{U}_{КЗ}$ и $\underline{I}_{КЗ}$ — напряжение и ток в месте установки защиты при рассматриваемом повреждении (КЗ).

$R_п$ — переходное сопротивление в месте замыкания, которое может увеличиваться из-за дуги или сопротивления заземления опоры при замыканиях на землю.

В табл. 3.2 представлены значения E, $\underline{Z}_S$ и $\underline{Z}_{КЗ}$ для основных видов КЗ в трёхфазной системе.

Номинальное напряжение равно $U_{ном}$ (всегда линейное). Коэффициент 1,1 учитывает то, что генераторы в системе обычно работают с перевозбуждением для лучшей стабильности системы. Поэтому, среднее напряжение на выводах генератора приблизительно на 10 % выше номинального напряжения системы. Для более подробной информации на эту тему смотри руководства по расчёту токов короткого замыкания (IEC 60909, часть 1). [3.25]

Для токов в данном представлении положительным является направление в линию. Для расчёта тока при КЗ на землю ($\underline{I}_E = -3\underline{I}_0$) используется следующее соотношение: $\underline{I}_E = -(\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3})$. Это должно быть принято во внимание при расчёте тока при КЗ на землю через фазные токи. При таком условии вычисленные фазные токи и ток в земле имеют разные знаки. На векторной диаграмме и на осциллограмме аварийного режима такое условие означает, что подобно токам поврежденных фаз при двухфазном КЗ, фазный ток и ток в земле всегда направлены в противоположные стороны (рис. 3.66).

Сопротивление источника

Сопротивление источника может быть определено по мощности короткого замыкания в месте установки защиты или по заданным значениям токов КЗ.

Таблица 3.2

Основные параметры поврежденного контура

Короткое замыкание	E	$\underline{I}_{КЗ,\,пр}$	$\underline{I}_{КЗ,\,обр}$	$\underline{Z}_{S,\,пр}$	$\underline{Z}_{S,\,обр}$	$\underline{Z}_{к.з,\,пр}$	$\underline{Z}_{к.з,\,обр}$
3-фазное К $^{(3)}$	$1{,}1 \cdot U_{ном}/\sqrt{3}$	$\underline{I}_ф$	0	$\underline{Z}_{S1}$	0	$\underline{Z}_{к.з1}$	0
1-фазное на землю К $^{(1)}$	$1{,}1 \cdot U_{ном}/\sqrt{3}$	$\underline{I}_ф$	$\underline{I}_E$	$\underline{Z}_{S1}$	$\underline{Z}_{SE}$	$\underline{Z}_{к.з1}$	$\underline{Z}_{к.з-E}$
2-фазное К $^{(2)}$	$1{,}1 \cdot U_{ном}$	$\underline{I}_{ф1}$	$\underline{I}_{ф2}$	$\underline{Z}_{S1}$	$\underline{Z}_{S1}$	$\underline{Z}_{к.з1}$	$\underline{Z}_{к.з1}$

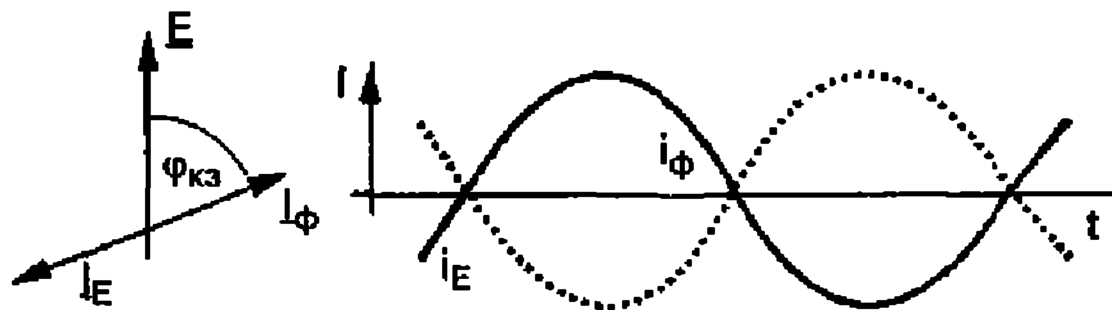


Рис. 3.66. Пример, иллюстрирующий смену знака токов (однофазное замыкание на землю)

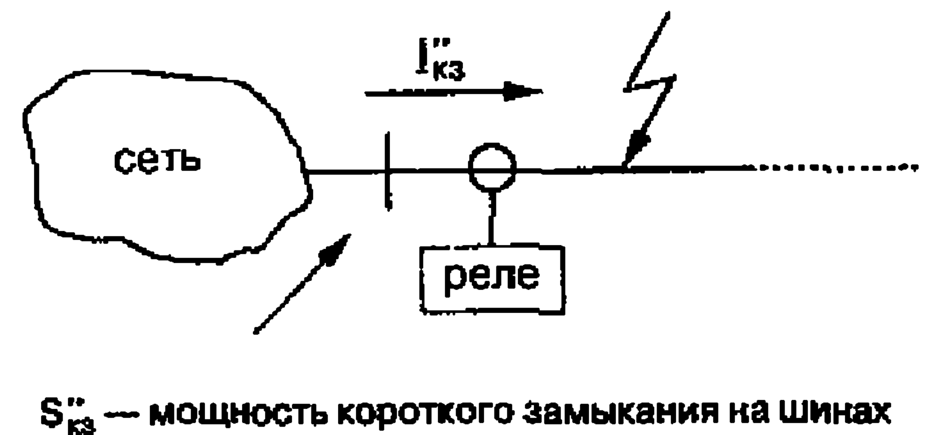


Рис. 3.67. Определение мощности КЗ в месте установки реле

Сопротивление прямой последовательности источника

$$Z_{S1} = \frac{1.1 \cdot U^2_{ном}}{S^{(3)}_{КЗ}} \text{ или}$$

$$Z_{S1} = \frac{1.1 \cdot U^2_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I''^{(3)}_{КЗ}}, \qquad (3.16)$$

$S^{(3)}_{КЗ}$ — мощность при 3-х фазном КЗ на шинах системы, $I''^{(3)}_{КЗ}$ — начальный ток короткого замыкания при трёхфазном КЗ на линии в месте установки защиты (рис. 3.67).

Для систем высокого или сверхвысокого напряжения можно принять, что $Z_S = X_S$, т. к. отношение X/R полного сопротивления источника велико (см. табл. 3.3).

Для более точных расчётов активная составляющая может быть учтена в соответствии с соотношениями R/X, указанными в табл. 3.3.[1]

Но если сопротивление источника определяется сопротивлениями кабельных или воздушных линий среднего напряжения, т. е. отношение X/R меньше 5 (в приближённых расчётах меньше 3), то для расчётов рекомендуется использовать комплексное сопротивление.

Сопротивление нулевой последовательности источника

При исследовании систем с помощью симметричных составляющих обычно необходимо значение сопротивления нулевой последовательности.

Сопротивление источника при замыкании на землю Z_{SE} может быть получено из следующих соотношений, в зависимости от исходных данных (активной составляющей пренебрегаем):

1. Задано отношение X_{S0}/X_{S1} на шинах:

$$X_{SE} = \frac{1}{3} \cdot X_{S1} \cdot \left(\frac{X_{S0}}{X_{S1}} - 1\right). \qquad (3.17)$$

[1] Данные для генераторов, трансформаторов, воздушных и кабельных линий содержатся в: Roeper: Short-circuit currents in three-phase systems, 1985 г. [3.10].

Таблица 3.3

Отношение *X/R* и постоянные времени систем

Уровень напряжения (кВ)	*X/R*	Эквивалентные постоянные времени систем (мс)
380	8—10	25—32
220	5—8	16—25
110	3—5	10—16

2. Задана мощность однофазного короткого замыкания

$$X_{SE} = \frac{1{,}1 \cdot U^2_{\text{ном}}}{S''^{(1)}_{\text{КЗ}}} - X_{S1}. \qquad (3.18)$$

3. Задан ток однофазного короткого замыкания

$$X_{SE} = \frac{1{,}1 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I''^{(1)}_{\text{КЗ}}} - X_{S1}. \qquad (3.19)$$

Полное сопротивление контура КЗ

Сопротивление контура КЗ обычно соответствует полному сопротивлению линии от места установки защиты до точки КЗ и рассчитывается, исходя из удельного сопротивления линии.

Сопротивление прямой последовательности

$$\underline{Z}_{\text{КЗ}1} = \underline{Z}_{L1} = R_{L1} + jX_{L1} \qquad (3.20)$$

где

$$R_{L1} = R'_{L1}\ [\text{Ом/км}] \cdot l\,[\text{км}] \qquad (3.21)$$

$$X_{L1} = X'_{L1}\ [\text{Ом/км}] \cdot l\,[\text{км}] \qquad (3.22)$$

Сопротивление нулевой последовательности

$$Z_{\text{КЗ-E}} = Z_{\text{L-E}} = 1/3 \cdot (Z_{L0} - Z_{L1}), \qquad (3.23)$$

— сопротивление, обусловленное взаимоиндукцией между двумя линиями «провод—земля»,

$$\text{где } Z_{L0} = R_{L0} + jX_{L0} \qquad (3.24)$$

сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной линии.

$$R_{L0} = R'_{L0}\ [\text{Ом/км}] \cdot \text{L}\,[\text{км}] \qquad (3.25)$$

$$X_{L0} = X'_{L0}\ [\text{Ом/км}] \cdot \text{L}\,[\text{км}] \qquad (3.26)$$

Типичные значения удельных сопротивлений для воздушных и кабельных линий разного уровня напряжения приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Типичные значения сопротивлений для воздушных линий и кабелей[1]

	R'_{L1}, [Ом/км]	X'_{L1}, [Ом/км]	φ_{L1}, °эл	R'_{L0}, [Ом/км]	X'_{L0}, [Ом/км]	φ_{L0}, °эл	R'_{LE}, [Ом/км]	X'_{LE}, [Ом/км]	R'_{LE}/R'_{L1}	X'_{LE}/X'_{L1}
Возд. линия 380 кВ с треугольным расположением проводов, один заземляющий проводник, расщепление на 4 провода 4 × Al/St 435/55	0,018	0,25	86	0,17	0,94	80	0,053	0,230	2,94	0,92
Возд. линия 220 кВ с треугольным расположением проводов, один заземляющий проводник, расщепление на 2 провода 2 × Al/St 265/35	0,058	0,3	79	0,22	0,99	77	0,53	0,23	0,91	0,77

Продолжение табл. 3.4

	R'_{L1}, [Ом/км]	X'_{L1}, [Ом/км]	φ_{L1}, ° эл	R'_{L0}, [Ом/км]	X'_{L0}, [Ом/км]	φ_{L0}, ° эл	R'_{LE}, [Ом/км]	X'_{LE}, [Ом/км]	R'_{LE} / R'_{L1}	X'_{LE} / X'_{L1}
Возд. линия 110 кВ с треугольным расположением проводов, один заземляющий проводник 1 × Al/St 435/35	*0,071*	*0,38*	*79*	*0,22*	*1,1*	*79*	*0,05*	*0,24*	*0,7*	*0,63*
Возд. линия 20 кВ без заземляющего проводника, 95 мм² Al	0,31	0,37	50	0,53	1,58	71	0,073	0,4	0,24	1,08
Кабель 400 кВ, одножильный, маслонаполненный 3 × 1 × 1200 мм² Cu	0,02	0,22	85	0,049	0,11	66	0,01	–0,036	0,5	–0,16
Кабель 110 кВ, газонаполненный, 240 мм² Cu	0,09	0,14	57	0,39	0,16	22	0,1	0,007	1,11	0,05
Кабель 20 кВ, экранированный 3 × 120 мм² Cu	0,16	0,12	37	1,4	0,25	10	0,41	0,043	3,42	0,36

[1] Для более подробной информации см.: Roeper: Short-circuit currents in three-phase systems, 1985 г. [3.10]

Таблица 3.5

Типы коротких замыканий и контура для дистанционных измерений

Тип замыкания	Повреждённые фазы*	Петли КЗ для дистанционных измерений
Двухфазное КЗ без земли	L1-L2 L2-L3 L3-L1	L1-L2 L2-L3 L3-L1
Трёхфазное замыкание без земли	L1-L2-L3	L1-L2 или L2-L3 или L3-L1
Однофазное замыкание на землю	L1-E L2-E L3-E	L1-E L2-E L3-E
Двухфазное КЗ на землю	L1-L2-E L2-L3-E L3-L1-E	L1-E или L2-E или L1-L2 L2-E или L3-E или L2-L3 L3-E или L1-E или L3-L1
Трехфазное КЗ на землю	L1-L2-L3-E	L1-L2 или L2-L3 или L3-L1 L1-E или L2-E или L3-E

* Обозначения L1, L2, L3 соответствуют фазам A, B, C; E — земля или заземленная нулевая точка сети «0».

Контур повреждения (петли КЗ)

В обычной трёхфазной системе существует ряд возможных контуров замыкания, в зависимости от того, какие фазы повреждены и есть ли соединение с землёй.

В общем случае необходима оценка всех возможных контуров замыкания (табл. 3.5).

При однофазных замыканиях на землю и при двухфазных КЗ без земли и на землю достаточно рассмотрения только одного контура, тогда как при других видах замыканий необходимо рассмотреть несколько контуров.

3.2.2. Определение полного сопротивления контура замыкания

Измерительные цепи реле сопротивления выполняются так, что для каждого вида КЗ определяется полное сопротивление ($Z_{КЗ\,пр}$ на рис. 3.65) поврежденного контура. Это сопротивление соответствует сопротивлению прямой последовательности воздушной линии, если она симметрична и транспонирована.[1]

Благодаря этому, для каждого вида КЗ измеряемое сопротивление пропорционально расстоянию до места замыкания.

Традиционная дистанционная защита

При междуфазных КЗ сопротивление петли КЗ определяется отношением линейного напряжения $U_{лин} = U_{Ф\text{-}Ф}$ петли «фаза—фаза» к разности токов соответствующих (поврежденных) фаз $I_{Ф\text{-}Ф}$:

$$Z_{Ф\text{-}Ф} = \frac{\underline{U}_{Ф\text{-}Ф}}{I_{Ф\text{-}Ф}} = \frac{\underline{U}_{Ф1\text{-}E} - \underline{U}_{Ф2\text{-}E}}{I_{Ф1} - I_{Ф2}} \tag{3.27}$$

где цифры 1 и 2 соответствуют поврежденным фазам. $\underline{I}_{Ф\text{-}Ф}$ и $\underline{U}_{Ф\text{-}Ф}$ — линейные значения тока и напряжения. При металлических КЗ ($R_п = 0$) для линий с односторонним питанием используются следующие соотношения (рис. 3.65):

$$\underline{U}_{Ф\text{-}Ф} = \underline{I}_{Ф1} \cdot \underline{Z}_{КЗ1} - \underline{I}_{Ф2} \cdot Z_{КЗ1} \tag{3.28}$$

Тогда, $\underline{Z}_{ФФ} = \underline{Z}_{КЗ1}$

При однофазных КЗ на землю сопротивление петли КЗ («фаза—земля») определяется отношением напряжения поврежденной фазы $U_{Ф\text{-}E}$ к компенсированному фазному току.

$$\underline{Z}_{Ф\text{-}E} = \frac{\underline{U}_{Ф\text{-}E}}{\underline{I}_Ф - \underline{K}_E \underline{I}_E} = \frac{\underline{U}_Ф}{\underline{I}_Ф + \underline{K}_0 3 \underline{I}_0}, \tag{3.29}$$

где $\underline{K}_E = \underline{K}_0$ — комплексный коэффициент компенсации тока нулевой последовательности. Он соответствует отношению $\underline{Z}_E/\underline{Z}_L$ воздушной линии. Значение Z_E рассчитывается по соотношению (3.24); $I_E = -3I_0$.

Используя рис. 3.65 и табл. 3.2, получаем следующее соотношение:

$$\underline{U}_{Ф\text{-}E} = \underline{I}_Ф \cdot \underline{Z}_{КЗ1} - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_{КЗ\text{-}E} =$$

$$= \underline{Z}_{КЗ1} \cdot \left(\underline{I}_Ф - \frac{\underline{Z}_{КЗ\text{-}E}}{\underline{Z}_{КЗ1}} \cdot \underline{I}_E\right). \tag{3.30}$$

Подставляя выражение (3.30) в (3.29), получаем

$$\underline{Z}_{Ф\text{-}E} = \underline{Z}_{КЗ1} \cdot \frac{\left(\underline{I}_Ф - \frac{\underline{Z}_{КЗ\text{-}E}}{\underline{Z}_{КЗ1}} \cdot \underline{I}_E\right)}{\underline{I}_Ф - \underline{K}_0 \cdot \underline{I}_E}. \tag{3.31}$$

Из этого выражения хорошо видно, что сопротивление линии определяется правильно, если коэффициент $\underline{K}_0 = \underline{Z}_{КЗ\text{-}E}/\underline{Z}_{КЗ1}$, т. е если значение $\underline{K}_0$ соответствует защищаемой линии.

[1] Влияние несимметрии нетранспонированных воздушных линий рассмотрено в п.п. 3.5.5.

Но нужно помнить, что $\underline{K}_0$ — комплексное число.

В электромеханических реле можно установить только его значение по модулю ($K_0 = |K_0|$). Соответственно, при возникновении замыканий на землю возникают погрешности измерений.

При защите воздушных линий, различие углов $\underline{Z}_E$ и $\underline{Z}_L$ относительно невелико, этой ошибкой можно пренебречь. Для кабелей различие углов $\underline{Z}_E$ и $\underline{Z}_L$ может достигать больших значений. В этом случае значение K_0 может быть определено графически пересечением характеристики срабатывания реле с годографом полного сопротивления контура замыкания на землю.

Только при применении аналогово-статических реле возможна угловая компенсация.

Рассмотренная компенсация возможна только при металлических замыканиях. При возникновении замыкания через переходное сопротивление, например, с сопротивлением дуги, угловая компенсация $\underline{K}_0 = |\underline{K}_0|\, e^{j\varphi_E}$ «заставляет» сопротивление замыкания вращаться на диаграмме сопротивлений, вызывая соответствующую ошибку измерений (см. п.п. 3.5.1) [3.26].

Всё, описанное выше, относится и к цифровым реле, которые используют традиционные принципы измерения.

3.2.3. Цифровое вычисление полного сопротивления

Цифровое определение полного сопротивления повреждённого контура по дискретным сигналам тока и напряжения — это первоначальный этап измерения сопротивления и определения места короткого замыкания.

В случае выполнения измерений с помощью реле сопротивления с многоугольными характеристиками, вычисленные значения (R и X) полного сопротивления повреждённого контура можно просто сравнить с границами зоны срабатывания на диаграмме сопротивлений. Этого достаточно для определения, где находится замыкание: внутри или вне зоны срабатывания. В принципе, этот способ применим к РС с характеристиками любой формы, однако, в случае использования круговых (МНО) характеристик, предпочтительнее традиционное сравнение фаз векторов тока и напряжения (см. п.п. 3.4.1).

Определение расстояния до места замыкания производится по вычисленному значению реактивного сопротивления (см. 3.1.13).

Процесс вычисления

Применяется следующее дифференциальное уравнение контура короткого замыкания в временной области:

$$u_{КЗ}(t) = R_{КЗ} \cdot i_{КЗ}(t) + L_{КЗ} \cdot \frac{di_{КЗ}(t)}{dt}. \qquad (3.32)$$

В реле 7SA** дискретные значения тока и напряжения (выборки мгновенных значений) интегрируются модифицированными фильтрами Фурье и представляются в частотной области. В результате получаются векторные величины, представленные в виде ортогональных составляющих (вещественные и мнимые составляющие). Выделяется составляющая основной частоты, постоянная составляющая и высшие гармоники подавляются.

Из уравнения (3.32) получаем привычное векторное уравнение.

$$\underline{U}_{КЗ} = R_{КЗ} \cdot \underline{I}_{КЗ} + jX_{КЗ} \cdot \underline{I}_{КЗ} \qquad (3.33)$$

Разделением вещественных и мнимых составляющих получаем 2 уравнения для получения $R_{КЗ}$ и $X_{КЗ}$ (см. Приложение А.1).

Преимуществом раздельного определения вещественной и мнимой составляющих является то, что при замыканиях на землю реактивное сопротивление замыкания определяется правильно, даже если углы сопротивления прямой последовательности и сопротивления нулевой последовательности не равны (см. п.п. 3.5.1).

Уравнения для расчёта полного сопротивления

Теоретическое обоснование цифровых дистанционных измерений изложено в Приложении. Ниже представленные уравнения для определения полного сопротивления используются в дистанционных реле 7SA.

Эти уравнения могут быть использованы для расчёта сопротивления, «видимого» реле, по известным (рассчитанным) значениям тока и напряжения КЗ в месте установки реле. Но необходимо помнить, что при этом должны использоваться векторные величины тока и напряжения.

Данные уравнения дают правильные результаты и в нормальном режиме работы, т. е. позволяют определить сопротивление при протекании токов нагрузки. Это используется в пусковой ступени. Расчёт полного сопротивления нагрузки, измеряемого защитой, и сравнение его с уставкой пусковой ступени позволяет определить необходимый запас для предотвращения ложных пусков (при перегрузках, качаниях мощности, и т. д.). Определение междуфазных повреждений в системе возможно, если ток на защищаемой линии превышает на 20 % уставку. Измерения в контурах «фаза—земля» в реле 7SA511 производятся только при появлении тока или напряжения нулевой последовательности и, следовательно, не производятся в условиях симметричной нагрузки. В защитах 7SA513, 7SA522 и 7SA6, в общем случае, они производятся всегда, но эти реле могут быть запрограммированы на проведение таких измерений только при появлении тока замыкания на землю и/или напряжения нулевой последовательности.

При проведении испытаний реле величины, подаваемые на вход, должны быть заданы амплитудным значением и фазой.

Определение сопротивления петли в общем случае

На рис. 3.68 схематично представлен контур короткого замыкания. Первоначально рассматривается металлическое КЗ. Влияние переходного сопротивления в точке замыкания в дальнейшем может быть рассмотрено отдельно.

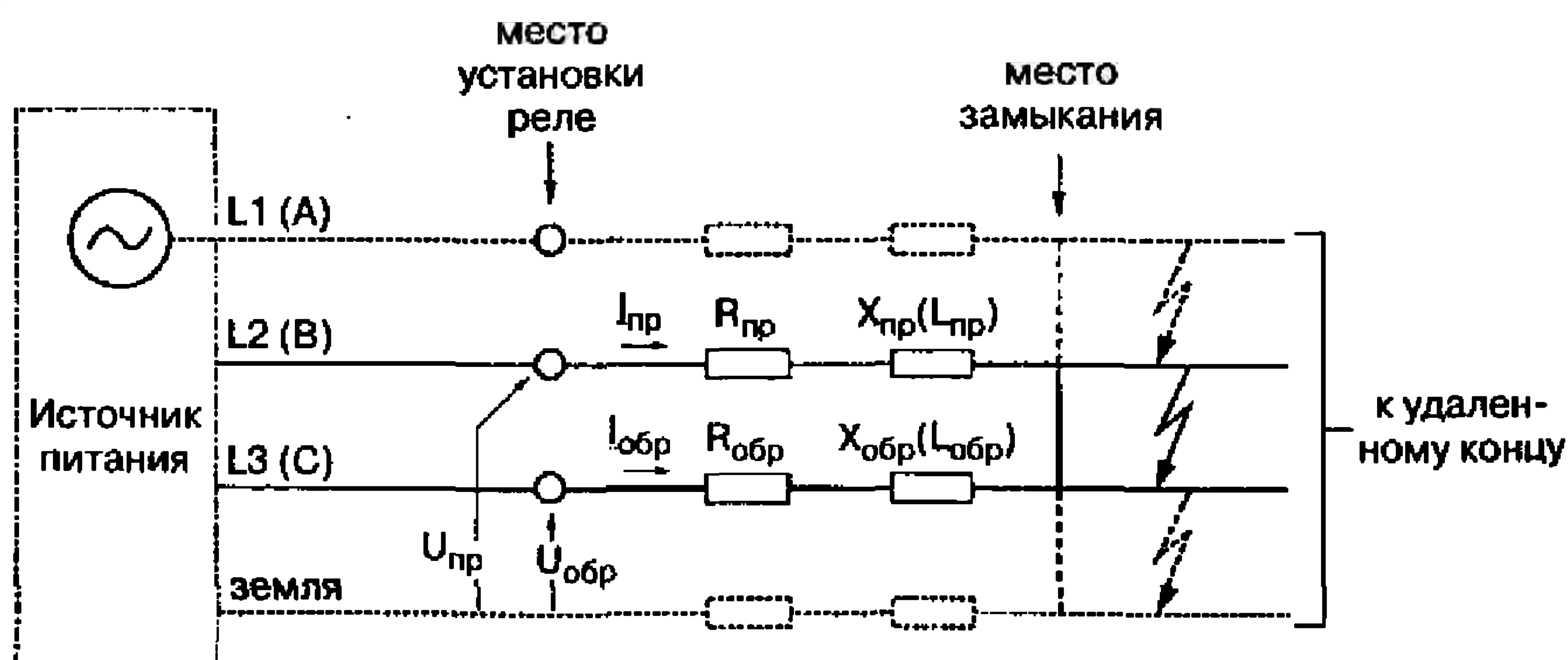


Рис. 3.68. Общий случай схемы замещения контура короткого замыкания

Очевидно, что в общем случае прямой и обратный токи в петле КЗ не равны. При двухфазном КЗ на землю, например, сумма прямых $\underline{I}_{пр}$ и обратных $\underline{I}_{обр}$токов течёт через землю и возвращается по различным путям к источнику (источникам).

Только при определённых видах замыканий и определенной конфигурации системы, как, например, при двухфазных КЗ без земли в сети с одним источником питания, выполняется условие $\underline{I}_{пр} = -\underline{I}_{обр}$.

В общем случае, сопротивления в прямом направлении ($R_{пр}$, $X_{пр}$) не равны сопротивлениям в обратном направлении ($R_{обр}$, $X_{обр}$).

В случае рассмотрения контуров «фаза—земля» должна быть учтена разница между фазным сопротивлением контура и сопротивлением земли. Это производится с помощью коэффициента компенсации $\underline{K}_0$, устанавливаемого в реле.

На нетранспонированных воздушных линиях существует несимметрия фазных сопротивлений, которая обычно не учитывается в измерительной системе дистанционных реле. Это означает, что для контуров «фаза—фаза» сопротивления в прямом и обратном направлениях принимаются равными. Если существует большая несимметрия, то уставки ступеней должны быть соответствующим образом скорректированы (см. п.п. 3.5.5).

Процесс вычисления

Повреждённому контуру соответствует следующее уравнение:

$$\underline{U}_{пр} - \underline{U}_{обр} = R_{пр} \cdot \underline{I}_{пр} + jX_{пр} \cdot \underline{I}_{пр} - R_{обр} \cdot \underline{I}_{обр} - jX_{обр} \cdot \underline{I}_{обр}, \quad (3.34)$$

где векторы определяются следующим образом

$$\underline{U} = U \cdot e^{j(\omega t + \varphi_U)} = U[\cos(\omega t + \varphi_U) + j\sin(\omega t + \varphi_U)];$$

$$\underline{I} = I \cdot e^{j(\omega t + \varphi_U)} = I[\cos(\omega t + \varphi_U) + j\sin(\omega t + \varphi_U)].$$

Решение данных уравнений (см. приложение А.1) дает следующие результаты:

Междуфазные контуры

В этом случае принимается, что $R_{пр} = R_{обр}$ и $X_{пр} = X_{обр}$ (симметричная система).

Из этого можно получить (например, для контура В-С):

$$R_{BC} = \frac{\mathrm{Re}\{\underline{U}_{BC}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\} + \mathrm{Im}\{\underline{U}_{BC}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\}}{[\mathrm{Re}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\}]^2 + [\mathrm{Im}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\}]^2} \quad (3.35)$$

$$X_{BC} = \frac{\mathrm{Im}\{\underline{U}_{BC}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\} - \mathrm{Re}\{\underline{U}_{BC}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\}}{[\mathrm{Re}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\}]^2 + [\mathrm{Im}\{\underline{I}_B - \underline{I}_C\}]^2}, \quad (3.36)$$

где $U_{BC} = U_B - U_C = \underline{U}_{лин}$ — линейное напряжение контура КЗ ($U_{ф-ф}$); I_B, I_C — токи в поврежденных фазах ($I_ф$).

Эти уравнения соответствуют следующим векторным величинам:

$$Z_{B-C} = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_C}{\underline{I}_B - \underline{I}_C}; \quad (3.38)$$

$$R_{B-C} = \mathrm{Re}\left\{\frac{\underline{U}_B - \underline{U}_C}{\underline{I}_B - \underline{I}_C}\right\}; \quad (3.39)$$

$$X_{B-C} = \mathrm{Im}\left\{\frac{\underline{U}_B - \underline{U}_C}{\underline{I}_B - \underline{I}_C}\right\}. \quad (3.40)$$

Если измеряемые величины представлены в векторной форме, т. е. амплитудой и фазой, то используются следующие соотношения:

$$R_{B-C}=\frac{U_{B-C}[I_B\cdot\cos(\varphi_{UB-C}-\varphi_{IB})]-}{I_B^2-2\cdot I_B\cdot I_C\times}\rightarrow$$

$$\rightarrow\frac{-I_C\cdot\cos(\varphi_{UB-C}-\varphi_{IC})}{\times\cos(\varphi_{IB}-\varphi_{IC})+I_C^2}. \qquad (3.41)$$

$$X_{B-C}=\frac{U_{B-C}[I_B\cdot\sin(\varphi_{UB-C}-\varphi_{IB})]-}{I_B^2-2\cdot I_B\cdot I_C\times}\rightarrow$$

$$\rightarrow\frac{-I_C\cdot\sin(\varphi_{UB-C}-\varphi_{IC})}{\times\cos(\varphi_{IB}-\varphi_{IC})+I_C^2} \qquad (3.42)$$

В случае двухфазного КЗ при одностороннем питании можно использовать следующее дополнительное условие (рис. 3.69):

$I_C=-I_B=I_ф$ и $\varphi_{IC}=\varphi_{IB}+180°$.

Это позволяет упростить уравнения (3.41) и (3.42):

$$R_{B-C}=\left\{\frac{U_{лин}\cdot\cos(\varphi_{Uлин}-\varphi_{Iф})}{2\cdot I_ф}\right\}=$$

$$=\frac{U_{лин}}{2\cdot I_ф}\cdot\cos\varphi_{КЗ}; \qquad (3.43)$$

$$X_{B-C}=\left\{\frac{U_{лин}\cdot\sin(\varphi_{Uлин}-\varphi_{Iф})}{2\cdot I_ф}\right\}=$$

$$=\frac{U_{лин}}{2\cdot I_ф}\cdot\sin\varphi_{КЗ} \qquad (3.44)$$

При трехфазном КЗ получаем следующие условия (рис. 3.70):

$I_B=I_C=I_{КЗ}$

$\varphi_{U(B-C)}-\varphi_{I(B)}=\varphi_{кз}+30°$

$\varphi_{U(B-C)}-\varphi_{I(C)}=\varphi_{кз}+150°$

$\varphi_{I(B)}-\varphi_{I(C)}=120°$

В результате получаем следующие упрощённые выражения:

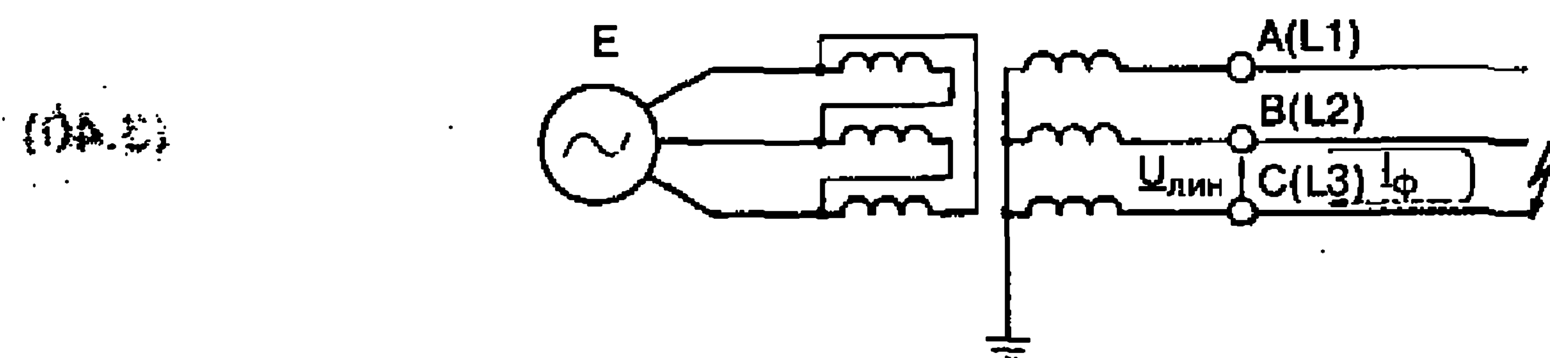
$$R_{B-C}=\frac{U_{лин}}{I_{КЗ}\cdot\sqrt{3}}\cdot\cos\varphi_{КЗ} \qquad (3.45)$$

$$X_{B-C}=\frac{U_{лин}}{I_{КЗ}\cdot\sqrt{3}}\cdot\sin\varphi_{КЗ} \qquad (3.46)$$

Если известны только фазные напряжения, для расчетов сопротивления петли «фаза—фаза» можно использовать следующие выражения:

$$R_{B-C}=\frac{U_B\cdot I_B\cdot\cos(\varphi_{UB}-\varphi_{IB})+U_C\cdot I_C\cdot\cos(\varphi_{UC}-\varphi_{IC})-}{I_B^2-2\cdot I_B\cdot I_C\times}\rightarrow$$

$$\rightarrow\frac{-U_B\cdot I_C\cdot\cos(\varphi_{UB}-\varphi_{IC})-U_C\cdot I_B\cdot\cos(\varphi_{UC}-\varphi_{IB})}{\times\cos(\varphi_{IB}-\varphi_{IC})+I_C^2} \qquad (3.47)$$



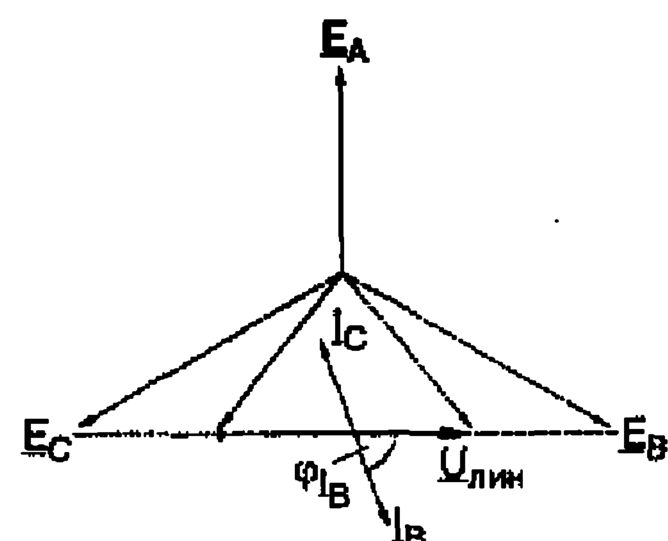


Рис. 3.69. Векторная диаграмма токов и напряжений при двухфазном КЗ ($K^{(2)}_{(BC)}$)

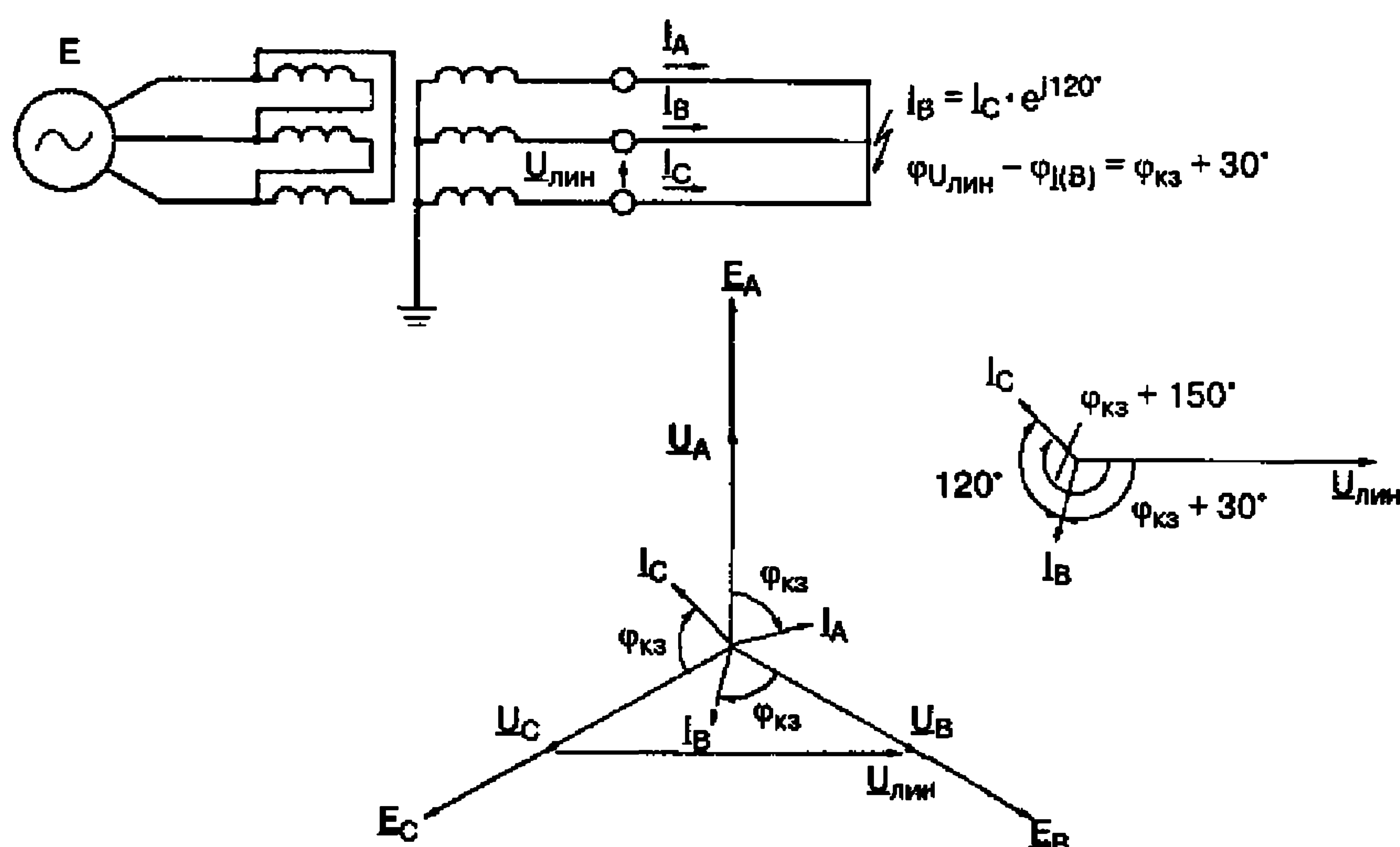


Рис. 3.70. Векторная диаграмма токов и напряжений при трехфазном КЗ ($K^{(3)}$)

$$X_{B\text{-}C} = \frac{U_B \cdot I_B \cdot \sin(\varphi_{UB} - \varphi_{IB}) + U_C \cdot I_C \cdot \sin(\varphi_{UC} - \varphi_{IC})}{I_B^2 - 2 \cdot I_B \cdot I_C \cdot \cos(\varphi_{IB} - \varphi_{IC}) + I_C^2} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \frac{-U_B \cdot I_C \cdot \sin(\varphi_{UB} - \varphi_{IC}) - U_C \cdot I_B \cdot \sin(\varphi_{UC} - \varphi_{IB}) -}{\times \cos(\varphi_{IB} - \varphi_{IC}) + I_C^2} \qquad (3.48)$$

Контур фаза—земля

На рис. 3.71 представлена расчетная схема при однофазном замыкании на землю $K_A^{(1)}$ (А-Е)

Необходимо заметить, что контур А-Е можно рассматривать и при других видах КЗ, например, при двухфазных КЗ на землю $K_{AB}^{(1,1)}$ (А-В-Е) и $K_{CA}^{(1,1)}$ (С-А-Е) или при трёхфазных КЗ.

В общем случае, следующие выражения можно использовать при всех видах КЗ на землю (1-, 2-, 3-фазные):

$$R_{\Phi\text{-}E} = \frac{\mathrm{Re}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_X\} + \mathrm{Im}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_X\}}{\mathrm{Re}\{\underline{I}_R\}\mathrm{Re}\{\underline{I}_X\} + \mathrm{Im}\{\underline{I}_R\}\mathrm{Im}\{\underline{I}_X\}} \qquad (3.49)$$

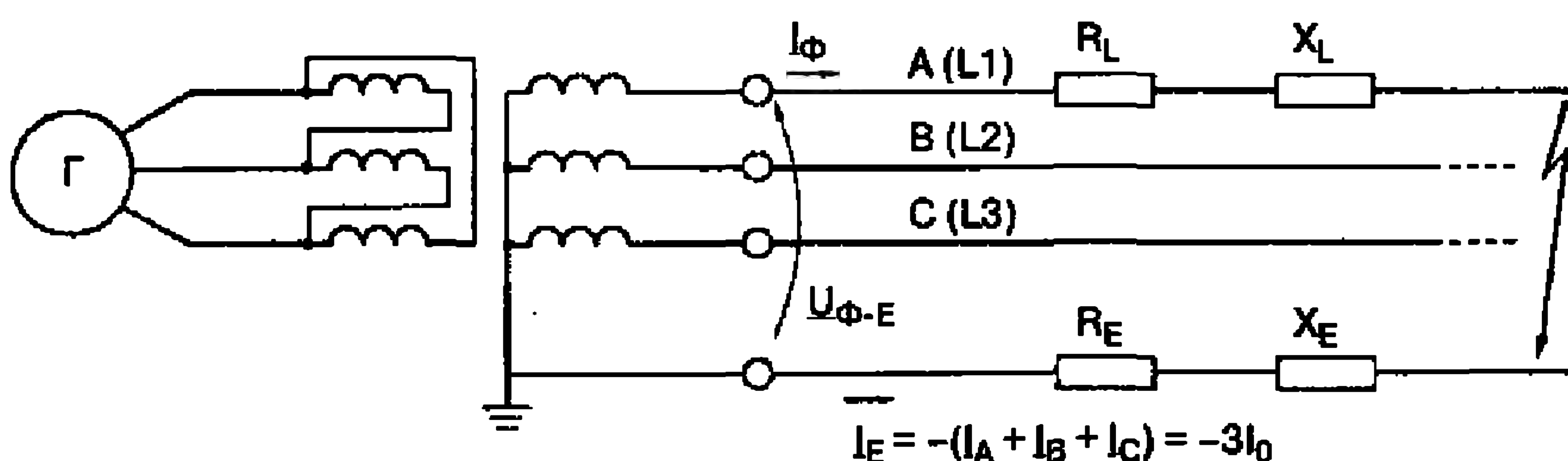


Рис. 3.71. Однофазное замыкание КЗ К $^{(1)}$

$$X_{\Phi\text{-}E} = \frac{\mathrm{m}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_R\} - (\mathrm{Re}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_R\}\}}{\mathrm{Re}\{\underline{I}_R\}\mathrm{Re}\{\underline{I}_X\} + \mathrm{Im}\{\underline{I}_R\}\mathrm{Im}\{\underline{I}_X\}}, \qquad (3.50)$$

где $\underline{I}_R = \underline{I}_\Phi - \frac{R_E}{R_L}\underline{I}_E$ и $\underline{I}_X = \underline{I}_\Phi - \frac{X_E}{X_L}\underline{I}_E$. $\qquad$ (3.51)

Коэффициенты компенсации тока нулевой последовательности $\frac{R_E}{R_L} = k_{RE}$ и $\frac{X_E}{X_L} = k_{XE}$ являются уставками реле. Указанные соотношения используются при проведении вычислений в комплексной форме.

В случае векторной формы представления электрических величин используются соотношения:

$$X_{\Phi\text{-}E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E}}{I_\Phi} \cdot \frac{\sin(\varphi_U - \varphi_B) - \frac{I_E}{I_\Phi} \cdot \frac{R_E}{R_L} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E}{X_L} + \frac{R_E}{R_L}\right) \cdot \frac{I_E}{I_\Phi} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_\Phi) + \frac{R_E}{R_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \left(\frac{I_E}{I_\Phi}\right)^2} \qquad (3.52)$$

$$R_{\Phi\text{-}E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E}}{I_\Phi} \cdot \frac{\cos(\varphi_U - \varphi_B) - \frac{I_E}{I_\Phi} \cdot \frac{R_E}{R_L} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_E)}{1 - \left(\frac{X_E}{X_L} + \frac{R_E}{R_L}\right) \cdot \frac{I_E}{I_\Phi} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_\Phi) + \frac{R_E}{R_L} \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot \left(\frac{I_E}{I_\Phi}\right)^2}, \qquad (3.53)$$

где $U_{\Phi\text{-}E}$ — напряжение КЗ (амплитудное значение напряжения петли «фаза—земля»); I_Φ — фазный ток КЗ (амплитудное значение); I_E — ток в земле (амплитудное значение) ($I_E = -3I_0$); φ_U — фаза напряжения КЗ; φ_Φ — фаза фазного тока КЗ; φ_E — фаза тока в земле; R_E/R_L и X_E/X_L — значения, устанавливаемые в реле для компенсации тока нулевой последовательности.

В случае однофазного короткого замыкания на землю токи $\underline{I}_\Phi$ и $\underline{I}_E$ практически находятся в противофазе.

Амплитуды при этом могут отличаться в зависимости от типа заземления. Если принять, что $\varphi_E = \varphi_\Phi + 180°$, то выражения (3.52) и (3.53) значительно упрощаются:

$$X_{\Phi\text{-}E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I)}{I_\Phi - \frac{R_E}{R_L} I_E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E} \cdot \sin\varphi_{K3}}{I_\Phi - \frac{R_E}{R_L} \cdot I_E} \qquad (3.54)$$

$$R_{\Phi\text{-}E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I)}{I_\Phi - \frac{R_E}{R_L} I_E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E} \cdot \cos\varphi_{K3}}{I_\Phi - \frac{R_E}{R_L} I_E} \qquad (3.55)$$

В этом случае,

φ_U — фаза напряжения короткого замыкания

φ_I — угол между векторами $\underline{I}_Ф$ и $\underline{I}_E$

$\varphi_U - \varphi_I = \varphi_{КЗ}$ — угол сопротивления петли короткого замыкания (фаза—земля).

Примечание:

В традиционных дистанционных защитах и устройствах для определения места повреждения используется следующие формулы для определения расстояния до места повреждения:

$$Z_{Ф-E} = \frac{U_{Ф-E}}{\underline{I}_Ф - \underline{k}_E \underline{I}_E}; \quad (3.56)$$

$$R_{Ф-E} = \mathrm{Re}\{\underline{Z}_{Ф-E}\}; \quad (3.57)$$

$$X_{Ф-E} = \mathrm{Im}\{\underline{Z}_{Ф-E}\}. \quad (3.58)$$

Необходимо учитывать, что результаты расчётов сопротивлений петли фаза—земля, выполняемых защитами типа 7SA, и расчётов, выполняемых традиционным способом, не всегда совпадают, что отмечено выше.

Результат, получаемый по (3.56), является верным только в том случае, если коэффициент $\underline{k}_E$ соответствует реальному отношению $\underline{Z}_E/\underline{Z}_L$ петли короткого замыкания. Это возможно только в случае, если переходное сопротивление в точке короткого замыкания равно 0 (металлическое КЗ)

Из-за переходного сопротивления в месте КЗ появляется погрешность в расчёте реактивной составляющей сопротивления петли короткого замыкания. Это рассмотрено в п.п. 3.5.1.

Пример расчёта:

Приведём пример использования вышеуказанных выражений.

Дана одноцепная воздушная линия 110кВ со следующими параметрами:

Длина		l = 50 км
Удельное сопротивление:		
Прямая последовательность:	R'_{L1}	= 0,1286 Ом/км
	X'_{L1}	= 0,4023 Ом/км
Нулевая последовательность:	R'_{L0}	= 0,2409 Ом/км
	X'_{L0}	= 1,0863 Ом/км

Предварительно условимся, что коэффициенты компенсации нулевой последовательности в реле 7SA6 соответствуют защищаемой линии:

$$R_E/R_L = (R'_0 - R'_1)/(3 \cdot R'_1) = 0{,}291$$

$$X_E/X_L = (X'_0 - X'_1)/(3 \cdot X'_1) = 0{,}567$$

Пример 1:

Однофазное короткое замыкание на землю А-Е ($K_A^{(1)}$) в конце линии.

Посредством компьютерной программы получены следующие значения токов и напряжений в месте установки реле:

$U_{A,Ф}$ = 53,51 кВ и $\varphi_{UA} = -1{,}4°$

I_A = 1,6415 кА и $\varphi_{IA} = -76{,}6°$

I_E = 1,6509 кА и $\varphi_{IE} = 103{,}4°$

(Знаки соответствуют рис. 3.66)

Чему равно значение полного сопротивления цепи замыкания в месте установки реле?

Решение

По выражениям (3.54) и (3.55) можно рассчитать X_{A-E} и R_{A-E}:

$$X_{A-E} = \frac{55{,}51 \cdot \sin(-1{,}4° + 76{,}6°)}{1{,}6415 + 0{,}567 \cdot 1{,}6509} = 20{,}07\ Ом$$

$$R_{A-E} = \frac{55{,}51 \cdot \cos(-1{,}4° + 76{,}6°)}{1{,}6415 + 0{,}291 \cdot 1{,}6509} = 6{,}44\ Ом$$

Значения, соответствующие параметрам линии:

$$X_{L1} = l \cdot X'_{L1} = 50 \cdot 0{,}4023 = 20{,}12\ Ом$$

$$R_{L1} = l \cdot R'_{L1} = 50 \cdot 0{,}1286 = 6{,}43\ Ом$$

Как видно, различие, обусловленное

емкостными зарядными токами линии, незначительно.

Пример 2

Двухфазное КЗ на землю $K_{AB}^{(1,1)}$ (А-В-Е) в конце линии.

Следующие параметры короткого замыкания были получены в результате записи электрических величин аварийного режима:

$U_{A\text{-}E} = 51{,}939$ кВ и $\varphi_{UA} = -5{,}21°$

$U_{B\text{-}E} = 50{,}516$ кВ и $\varphi_{UB} = -119{,}05°$

$I_A = 2{,}098$ кА и $\varphi_{IA} = -62{,}38°$

$I_B = 2{,}153$ кА и $\varphi_{IB} = 152{,}12°$

$I_E = 1{,}291$ кА и $\varphi_{IE} = 41{,}58°$

Необходимо определить полное сопротивление в контуре А-Е.

Решение:

По выражениям (3.52) и (3.53) получаем:

$$X_{A\text{-}E} = \frac{51{,}939}{2{,}098} \times$$

$$\times \frac{\sin(-5{,}21° + 62{,}38°) - \frac{1{,}291}{2{,}098} \cdot 0{,}291 \cdot \sin(-5{,}21° + 138{,}42°)}{1 - (0{,}567 + 0{,}291) \cdot \frac{1{,}291}{2{,}098} \cdot \cos(-138{,}42° + 62{,}38°) + 0{,}291 \cdot 0{,}567 \cdot \left(\frac{1{,}291}{2{,}098}\right)^2} =$$

$$= 20{,}20 \text{ Ом}$$

$$R_{A\text{-}E} = \frac{51{,}939}{2{,}098} \times$$

$$\times \frac{\cos(-5{,}21° + 62{,}38°) - \frac{1{,}291}{2{,}098} \cdot 0{,}567 \cdot \cos(-5{,}21° - 41{,}58°)}{1 - (0{,}567 + 0{,}291) \cdot \frac{1{,}291}{2{,}098} \cdot \cos(41{,}58° + 62{,}38°) + 0{,}291 \cdot 0{,}567 \cdot \left(\frac{1{,}291}{2{,}098}\right)^2} = 6.32 \text{ Ом}$$

Результаты опять практически равные значениям, полученным по параметрам линии.

Подобным образом можно рассчитать сопротивление для петли В-Е. Аналогично можно рассчитать значения $X_{A\text{-}B}$ и $R_{A\text{-}B}$ контурах фаза—фаза по соотношениям (3.43) и (3.44).

В обоих случаях мы получим практически те же значения, что и для контура А-Е. Читатель может проверить это в качестве упражнения.

3.3. Цифровое определение направления (поляризация)

В этом параграфе рассмотрено определение направления с помощью напряжения неповреждённых фаз (кросс-поляризации) и его запоминания.

3.3.1. Метод направленных измерений с помощью напряжения петли КЗ (самополяризация)

В п.п. 3.1.5 уже отмечалось, что направление замыкания может быть определено по углу между током и напряжением

КЗ или по знаку измеренного сопротивления короткого замыкания. Необходимо учесть, что реле должно измерять активно-индуктивное сопротивление. В этом случае напряжение всегда опережает ток короткого замыкания. На линиях с продольной компенсацией это не всегда выполняется, т. к. сопротивление замыкания может иметь ёмкостный характер, и ток будет опережать напряжение. Этот случай подробно рассмотрен в п.п. 3.5.6. В этом случае самополяризующиеся реле не могут быть использованы.

Более того, необходимо иметь в виду, что при близких коротких замыканиях сопротивление контура замыкания может быть очень маленьким (теоретически, нулевым) и точное определение замыкания невозможно. В традиционных электромеханических или статических реле нижний предел чувствительности при определении направления соответствует значению напряжения около 0,1 В. В более старых реле индукционного типа, чувствительность при определении направления была на уровне 1 В.

Зона, где невозможно точное определение направления, называется «мертвой зоной». При таких крайне маленьких значениях напряжения короткого замыкания одним из решений данной проблемы является использование соответствующего смещения характеристики срабатывания. В Германии в классических реле использовалось смещение характеристики в обратном направлении, т. е. охват начала координат для обеспечения надёжного отключения при близких КЗ в прямом направлении. При этом появлялся риск того, что при подключении фидера к заземлённой линии (например, при неснятом рабочем заземлении), сработают защиты на всех присоединениях к шинам.

Пользователи в некоторых других странах предпочитали поэтому предварительный выбор обратного направления.

Влияние нагрузки линии

На длинных линиях электропередачи на определение направления влияет нагрузка предшествующего режима вследствие угла сдвига фаз между ЭДС источников напряжения по концам линии [3.27]. Это важно в случае, когда при КЗ «за спиной» у защиты ток в месте установки защиты определяется удаленной ЭДС, а напряжение, в значительной мере, ближайшей. Типичный случай показан на рис. 3.72.

Рассмотрим поведение реле *Z1*, установленного на линии у шин подстанции В при близком внешнем КЗ через небольшое сопротивление дуги $R_Д$. В этом случае токи КЗ определяются, в основном, сопротивлениями систем S_A и S_B и линии, причем ток I_{LA} значительно меньше, чем ток I_{LB}. Падение напряжения на сопротивлении $R_Д$, соответствующее напряжению, подводимому к защите, определяется, в значительной степени, током I_{LB}. Результирующая диаграмма токов и напряжений представлена на рис. 3.72.

Защита *Z1* измеряет сопротивление $\underline{Z}_R = \frac{\underline{U}_B}{\underline{I}_{LB}}$, которое попадает в зону срабатывания реле сопротивления с МНО-характеристикой срабатывания. Для исключения срабатывания РС следует ограничить его зону срабатывания в прямом направлении (см. пунктирную линию на рис. 3.72).

Следует отметить, что реле с кросс-поляризацией, т. е. использующие в качестве поляризующего напряжение неповрежденных фаз, в меньшей степени подвержены рассмотренному влиянию нагрузки (см. далее п.п. 3.3.5 и 3.4.3).

В цифровых реле предусматривается

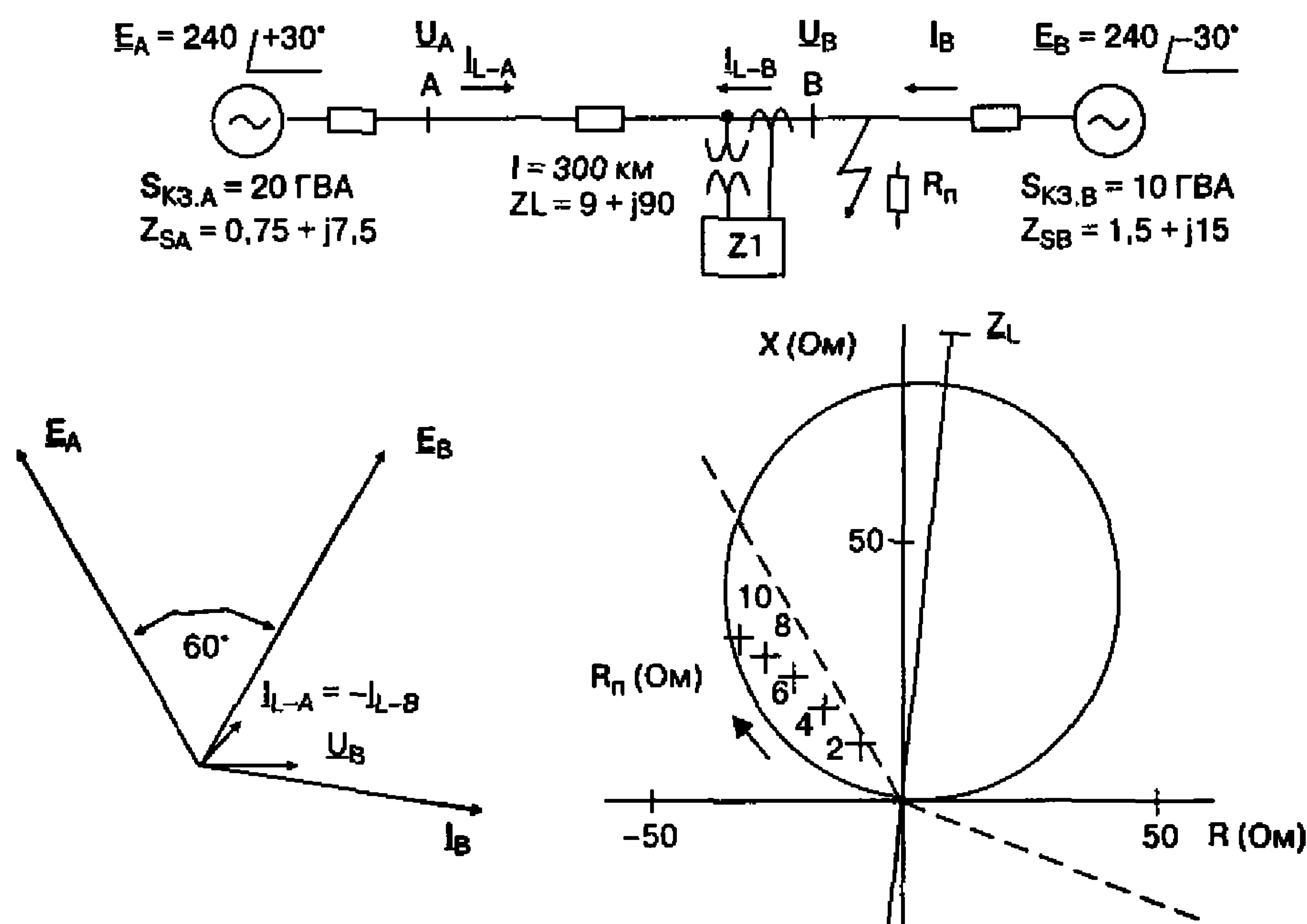


Рис. 3.72. Влияние нагрузки на определение направления: близкие КЗ в обратном направлении с переходным сопротивлением (на диаграмме U/I $R_п$ = 4 Ом)

возможность выбора наиболее целесообразного способа поляризации (самополяризация, кросс-поляризация, поляризация с использованием «памяти» напряжения предшествующего режима). Самополяризация, т. е. использование напряжений поврежденных фаз, является наиболее простым способом, поскольку измерения необходимы только для петли КЗ. Это имеет преимущества в случае сложных и многократных повреждений. Она используется, если на защищаемой линии отсутствует продольная компенсация и КЗ не вблизи места установки защиты (см. п.п. 3.37).

3.3.2. Определение направления с помощью напряжения неповрежденных фаз (кросс-поляризация)

Принцип определения направления по напряжениям неповреждённых фаз (кросс-поляризация) описан на примере однофазного короткого замыкания $k_A^{(1)}$ (рис. 3.73).

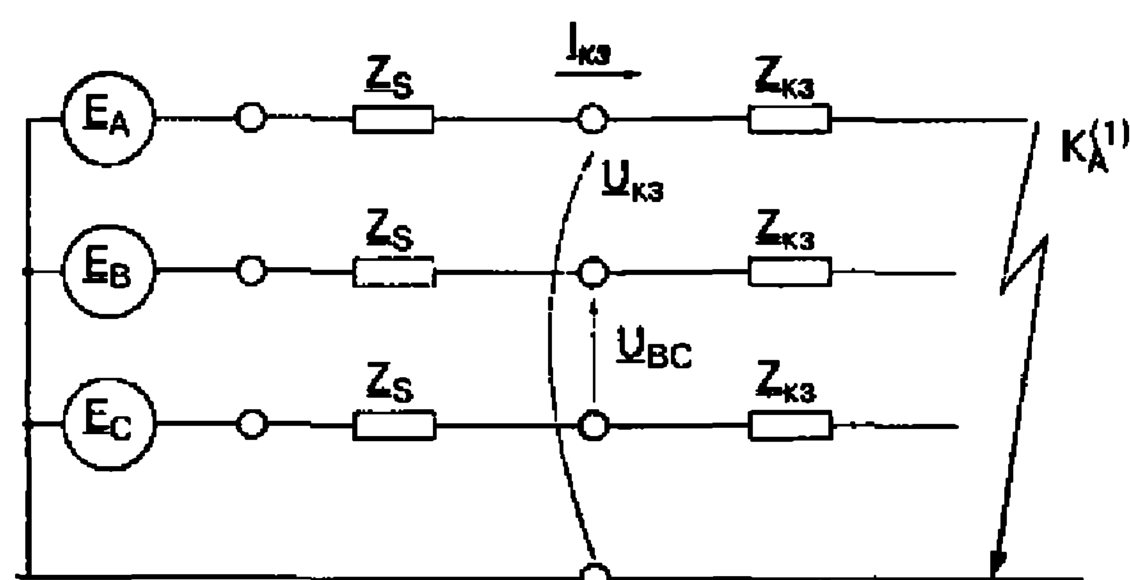
Для упрощения будем считать, что замыкание произошло на ненагруженной радиальной линии, т. е. влиянием тока нагрузки можно пренебречь. Таким образом, напряжение в режиме, предшествующем замыканию, приблизительно равно ЭДС источника.

Токи и напряжения при замыкании на землю фазы А представлены на диаграмме.

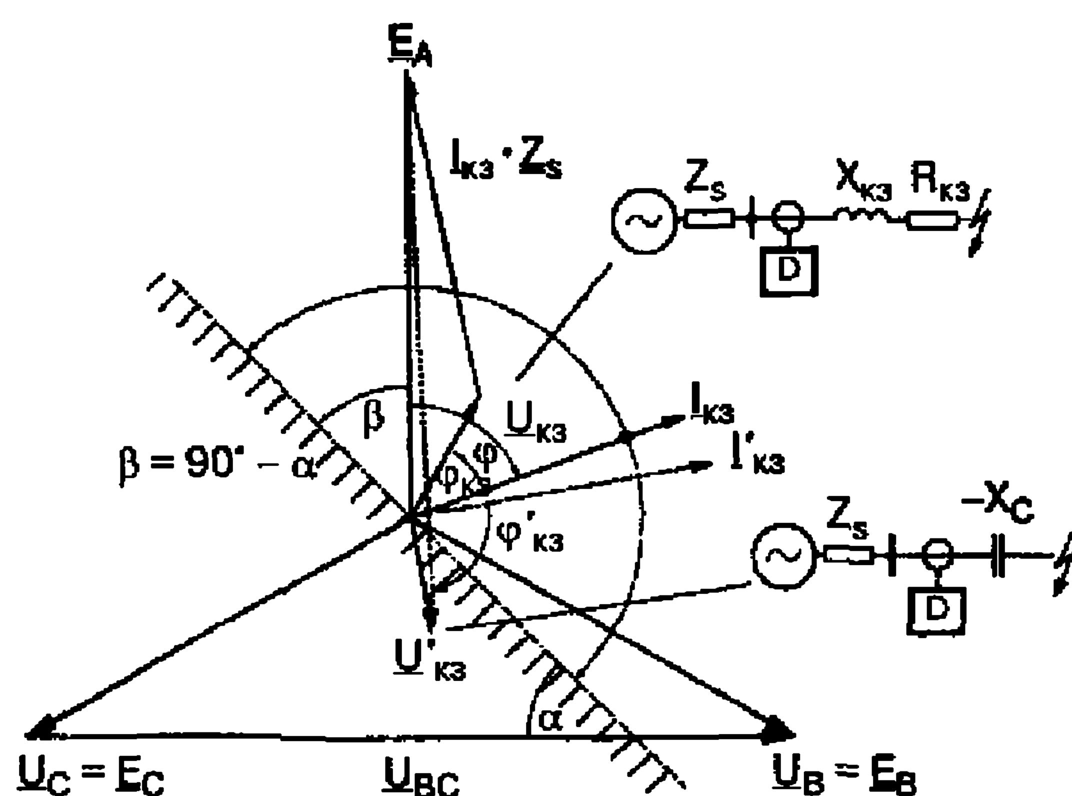
Ток короткого замыкания обусловлен ЭДС $\underline{E}_A$ и отстает от нее на угол φ, если сопротивление контура замыкания активно-индуктивное.

Напряжение короткого замыкания $\underline{U}_{КЗ\text{-}A}$ имеет амплитуду и фазу, зависящие от соотношения между $\underline{Z}_{КЗ}$ и $\underline{Z}_S$. Если оба сопротивления имеют одинаковый угол, то $\underline{U}_{КЗ\text{-}A}$совпадает по фазе $\underline{E}_A$, угол $\varphi_{КЗ} = \varphi$.

При возникновении близких КЗ через сопротивление дуги или при замыканиях



а) Эквивалентная схема



б) Векторная диаграмма токов и напряжений

Рис. 3.73. Определение направления с использованием напряжения неповрежденных фаз (кросс-поляризация)

на кабелях угол сопротивления цепи КЗ значительно меньше угла сопротивления источника питания (системы). Особенно существенным это различие будет в случае, когда сопротивление источника в основном состоит из сопротивлений генератора и трансформатора. Более того, необходимо учесть, что при близких замыканиях $\underline{Z}_S \gg \underline{Z}_{КЗ}$ *и угол φ практически не изменяется,* даже при изменении условий замыкания. В то же самое время, угол $\varphi_{КЗ}$ может достигать значений близких к 0° (близкие замыкания с сопротивлением дуги).

Крайняя ситуация возникает в том случае, если замыкание происходит за местом установки устройства продольной емкостной компенсации (УПК). В этом случае, знак напряжения КЗ изменится на противоположный соответственно измеренному отрицательному сопротивлению $X_{КЗ} = -X_C$[1]. Напряжение короткого замыкания отстаёт от КЗ приблизительно на 90°, хотя замыкание находится в прямом направлении рис. 3.73.

Таким образом, на линиях с продольной *емкостной компенсацией напряжение* поврежденной фазы при КЗ не может быть использовано для определения направления. Для определения направления вместо напряжения поврежденной фазы (например, $\underline{U}_{K.A}$) можно использовать линейное напряжение неповрежденных фаз ($\underline{U}_{B\text{-}C}$).

На рис. 3.73, *б* можно видеть, что при рассмотренных замыканиях угол между током $\underline{I}_{КЗ}$ и напряжением $\underline{U}_{B\text{-}C}$ практически не изменяется. Только в случае замыкания в обратном направлении ток КЗ изменит свое направление приблизительно на 180°. Таким образом, измерение угла между током КЗ и линейным напряжением неповреждённых фаз даёт 100 % определение направления.

Угол сдвига линейного напряжения неповреждённых фаз должен быть подобран так, чтобы получилась та же направленная характеристика, что и при использовании напряжения повреждённой фазы. Для этого вектор напряжения $\underline{U}_{B\text{-}C}$ на рис. 3.73, *б* должен быть сдвинут на угол 90° в прямом направлении (против часовой стрелки) для получения угла,

[1] На практике всегда $|X_C| < |X_S|$ (см. 3.5.6).

равного углу напряжения контура короткого замыкания ($\underline{U}_A$).

В случае цифровых реле полное сопротивление рассчитывается с помощью напряжений неповреждённых фаз. Затем это сопротивление сравнивается с направленной характеристикой на диаграмме сопротивлений.

Характеристика направления, в самом простом случае, представляет собой прямую линию (7SA511) с наклоном $\alpha = 45°$ относительно линейного напряжения, как показано на рис. 3.73, *б*.

В этом случае, считается, что замыкание произошло в прямом направлении, если ток $\underline{I}_{КЗ}$ отстаёт от напряжения поляризации $\underline{U}_{B\text{-}C}$ на угол меньше 45° или опережает его на угол меньше 135°.

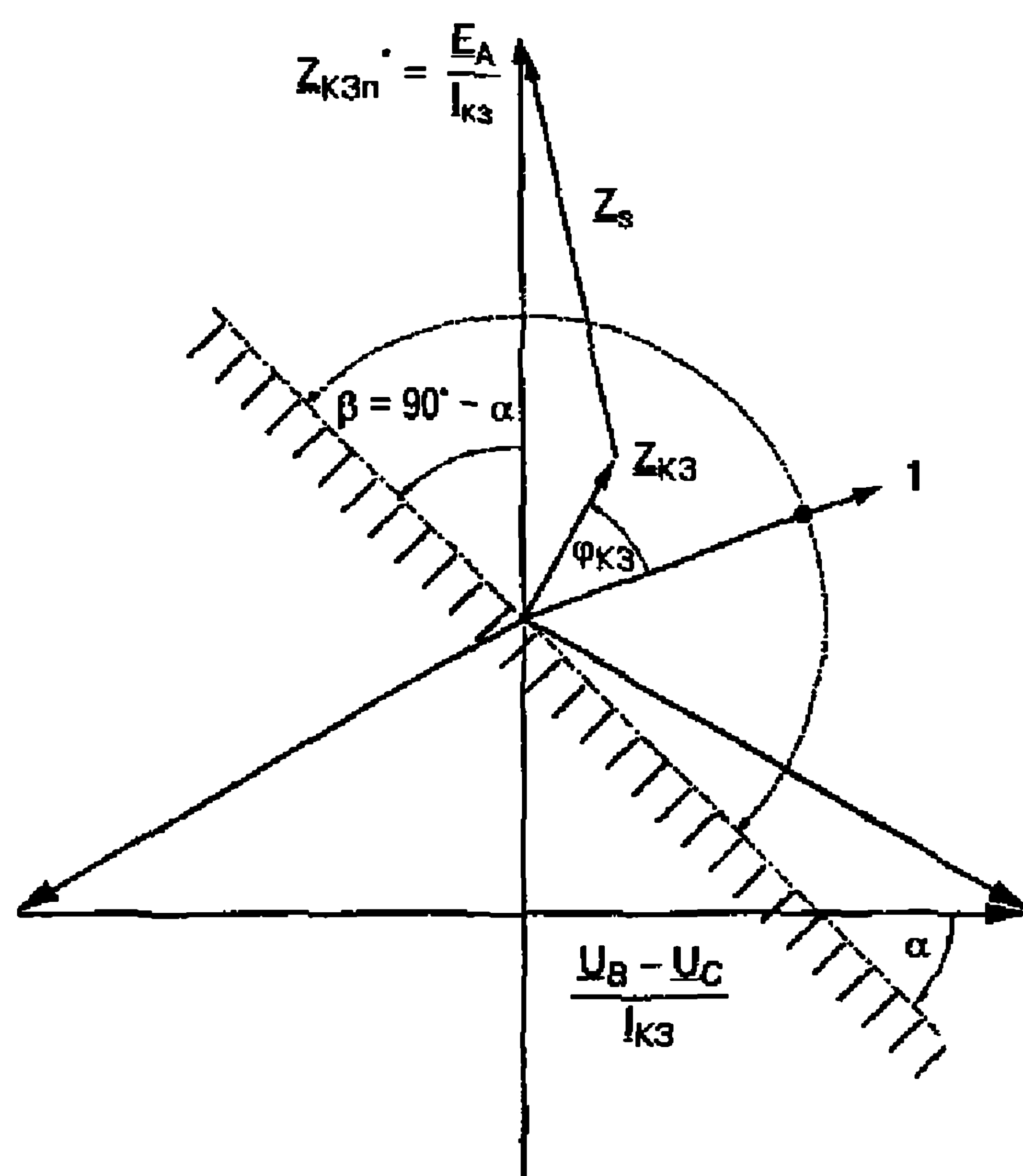


Рис. 3.74. Диаграмма полных сопротивлений

3.3.3. Направленная характеристика на плоскости комплексных сопротивлений

Для получения направленной характеристики на плоскости комплексного сопротивления (рис. 3.74) напряжения (рис. 3.73, *б*) делятся на ток короткого замыкания. Вектор сопротивления поляризации $\underline{Z}_{КЗп}$ соответствует напряжению неповреждённого контура, повёрнутому на угол 90° в прямом направлении. Если мы определим единичный вектор «1», как новую ось диаграммы сопротивлений, и повернём все остальные вектора, то получим диаграмму сопротивлений (рис. 3.75), где зафиксировано сопротивление контура короткого замыкания $\underline{Z}_{КЗ}$ и характеристики зон срабатывания реле (см. рис. 3.3 п.п. 3.1.3)

На рис. 3.74 напряжение неповреждённого контура $\underline{E}_A$ или соответствующее сопротивление $\underline{Z}_{КЗп}{}^*$ являются опорными векторами. Реле указывает прямое направление, до тех пор, пока вектор «1», т. е. ток, находится внутри угловой области, представленной пунктирной дугой.

На рис. 3.75 представлено условие преобразования: вектор «1» направляется по действительной оси, и $\underline{Z}_{КЗп}{}^*$, соответственно, может лежать внутри области, ограниченной пунктирной дугой, что будет обозначать наличие замыкания в прямом направлении.

Сдвиг направленной характеристики, пропорциональный сопротивлению источника, позволяет точно определить направление замыкания даже при близких замыканиях, когда напряжение КЗ, а, следовательно, и сопротивление, практически равно нулю. Направление короткого замыкания определяется правильно, даже если оно произошло за УПК, при отрицательном значении сопротивления КЗ.

Однако необходимо уточнить, что

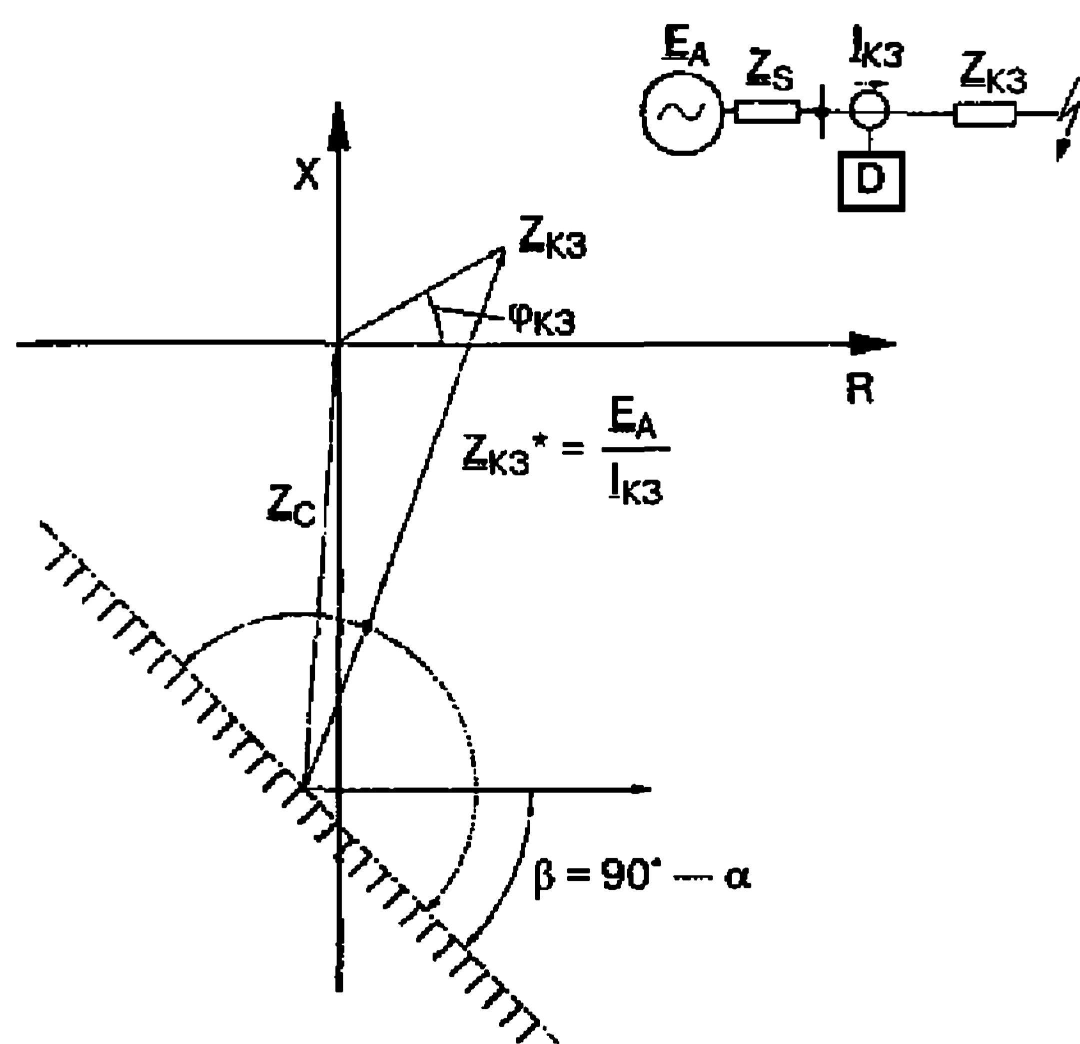


Рис. 3.75. Характеристика направленности на диаграмме полных сопротивлений для замыканий в прямом направлении

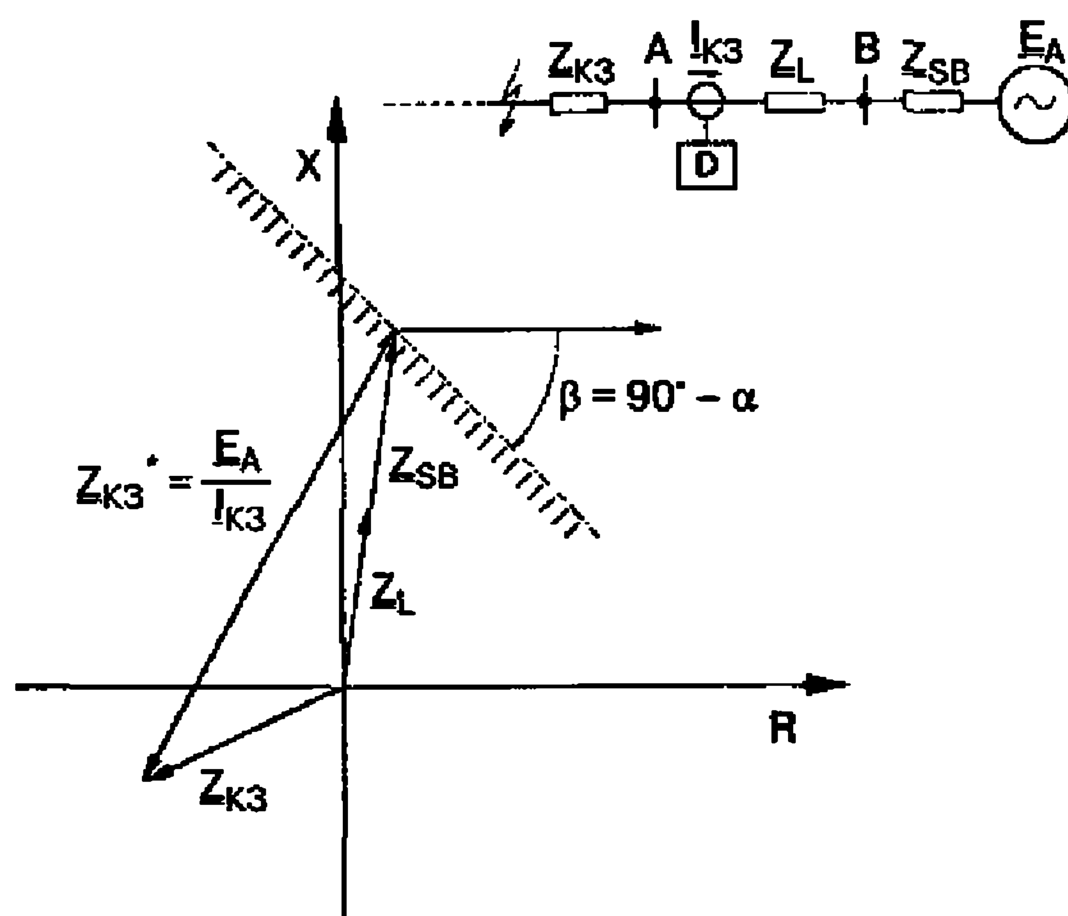


Рис. 3.76. Характеристика направленности на диаграмме полных при повреждениях сопротивлений в обратном направлении

рис. 3.75 может использоваться только для замыканий в прямом направлении.

При замыканиях в обратном направлении ток КЗ, а, следовательно, и ток в реле, меняет свое направление (знак) на противоположное. В результате, расположение векторов тока КЗ относительно поляризующего напряжения $\underline{U}_{B\text{-}C}$ или вектора $\underline{E}_A$ изменяется. А, следовательно, замыкания в обратном направлении должны быть изображены на отдельной диаграмме (рис. 3.76).

Это снова доказывает, что близкие КЗ и замыкания в обратном направлении за *последовательным компенсатором* определяются правильно.

Замечание:

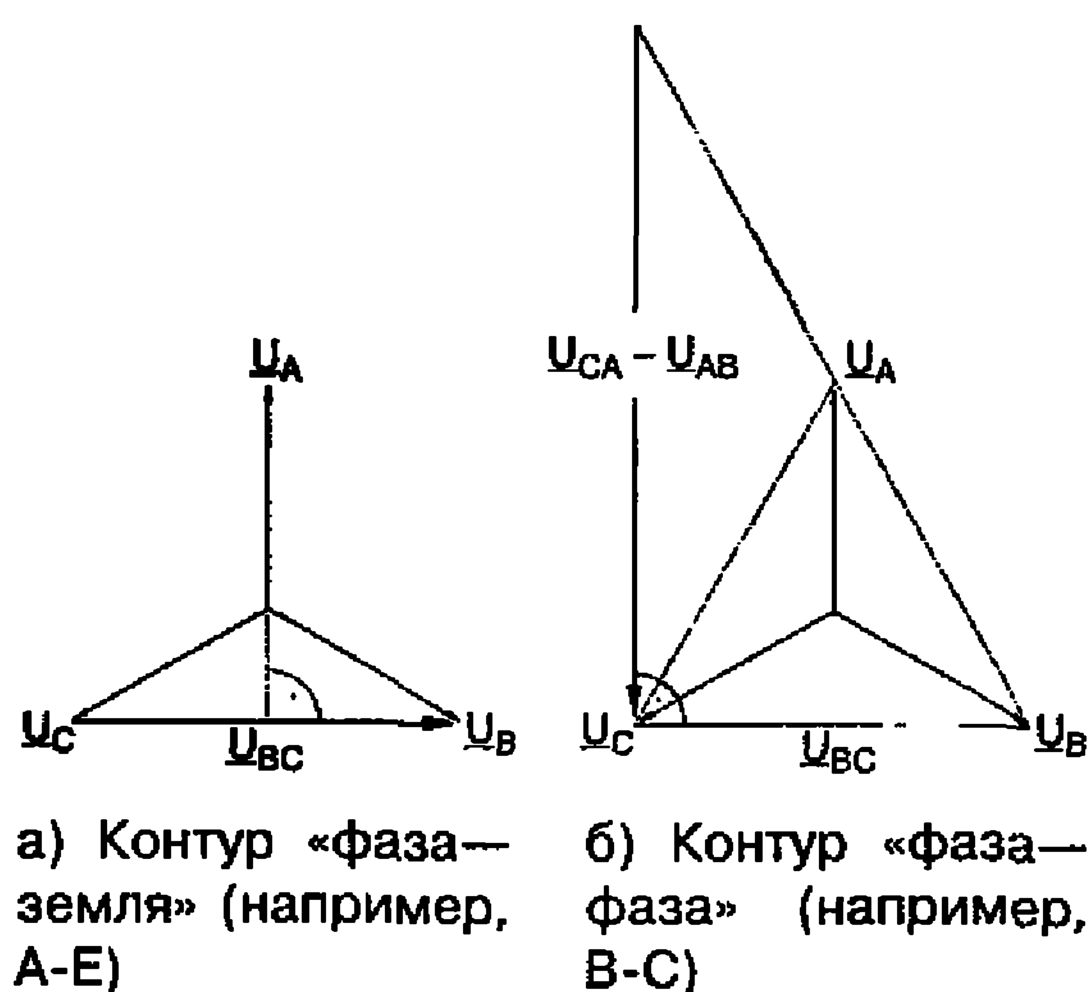
На практике принято изображать характеристику направленности в виде прямой линии, проходящей через начало координат диаграммы сопротивлений (или двух прямых линий, сходящихся в точке начала координат под каким-то углом). Это верно для традиционных реле сетей среднего напряжения (R1KZ4, 7SL70), где использовалось напряжение повреждённых фаз. Строго говоря, это представление также верно и для реле, использующих напряжение неповреждённых фаз для поляризации, если ЛЭП питается от источника с бесконечной мощностью, т. е. $\underline{Z}_S = 0$.

В общем случае это допущение применимо, если нет никаких ограничивающих условий для близких замыканий.

На линиях с последовательной компенсацией и на длинных нагруженных линиях электропередачи требуется более точное представление характеристики направленности, приведенное ниже.

3.3.4. Выбор напряжения кросс-поляризации

Принцип определения направления по напряжению неповреждённых фаз уже был описан на примере однофазного КЗ на землю.



а) Контур «фаза—земля» (например, А-Е)

б) Контур «фаза—фаза» (например, В-С)

Рис. 3.77. Опорное напряжение для определения направления при использовании напряжений неповрежденных фаз

Использование этого принципа возможно при всех других видах замыканий. В цифровых реле всегда выбирается напряжение поляризации, повёрнутое на 90° (напряжение кросс-поляризации) (рис. 3.77 и табл. 3.6).

Естественно, в случае трёхфазного КЗ неповреждённых фаз нет. Поэтому в цифровых реле используется запоминание напряжений поляризации, соответствующих режиму, предшествующему КЗ. Гарантируется возможность использования напряжения неповреждённого контура для определения направления в течение необходимого времени (до 2 с в реле 7SA522 и 7SA6).

3.3.5. Влияние нагрузки

До сих пор рассматривались только ненагруженные линии, т. е. считалось, что напряжение неповреждённого контура равно ЭДС источника.

Однако на практике следует учитывать влияние нагрузки, поскольку напряжение в месте установки реле отличается от напряжения источника на значение падения напряжения на нагруженной линии (рис. 3.78).

При определении направления необходимо учитывать угол поворота δ, обусловленный действительными токами нагрузки, проходящими по воздушной линии.

Поворот поляризующего напряжения неповреждённых фаз вызывает соответствующий поворот в противоположную сторону характеристики направленности (рис. 3.79). Это может быть получено по рис. 3.74 и 3.75.

Таблица 3.6

Соответствие измеряемых величин для определения направления

Измеряемый контур	Измеряемый ток (расстояние)	Измеряемое напряжение (расстояние)	Измеряемый ток (направление)	Измеряемое направление (направление)
А-Е	$\underline{I}_A - \underline{K}_0\underline{I}_E$	$\underline{U}_{A\text{-}E}$	$\underline{I}_A\,(-\underline{K}_0\underline{I}_E)$[1]	$\underline{U}_{B\text{-}C}$
В-Е	$\underline{I}_B - \underline{K}_0\underline{I}_E$	$\underline{U}_{B\text{-}E}$	$\underline{I}_B\,(-\underline{K}_0\underline{I}_E)$[1]	$\underline{U}_{C\text{-}A}$
С-Е	$\underline{I}_C - \underline{K}_0\underline{I}_E$	$\underline{U}_{C\text{-}E}$	$\underline{I}_C\,(-\underline{K}_0\underline{I}_E)$[1]	$\underline{U}_{A\text{-}B}$
А-В	$\underline{I}_A - \underline{I}_B$	$\underline{U}_{A\text{-}B}$	$\underline{I}_A - \underline{I}_B$	$\underline{U}_{B\text{-}C} - \underline{U}_{C\text{-}A}$
В-С	$\underline{I}_B - \underline{I}_C$	$\underline{U}_{B\text{-}C}$	$\underline{I}_B - \underline{I}_C$	$\underline{U}_{C\text{-}A} - \underline{U}_{A\text{-}B}$
С-А	$\underline{I}_C - \underline{I}_A$	$\underline{U}_{C\text{-}A}$	$\underline{I}_C - \underline{I}_A$	$\underline{U}_{A\text{-}B} - \underline{U}_{B\text{-}C}$

[1] Составляющая $\underline{K}_0\underline{I}_E$ учитывается только в случае однофазных замыканий на землю.

Примечание: $\underline{K}_0 = \underline{Z}_E/\underline{Z}_L$.

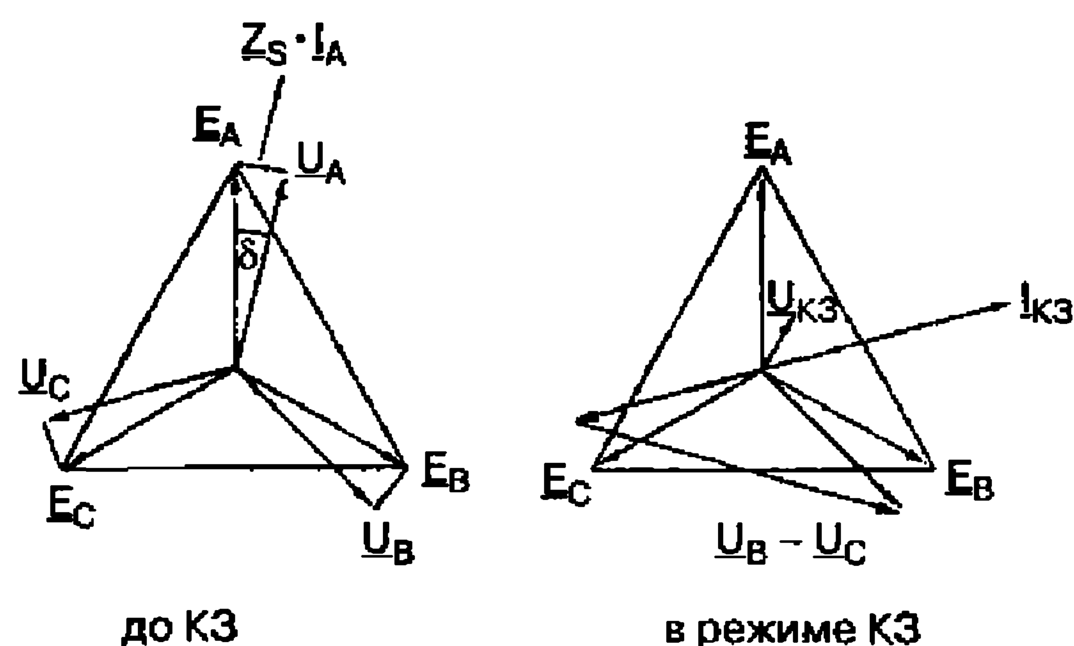


Рис. 3.78. Векторная диаграмма напряжений при возникновении замыкания на землю с учетом протекания токов нагрузки

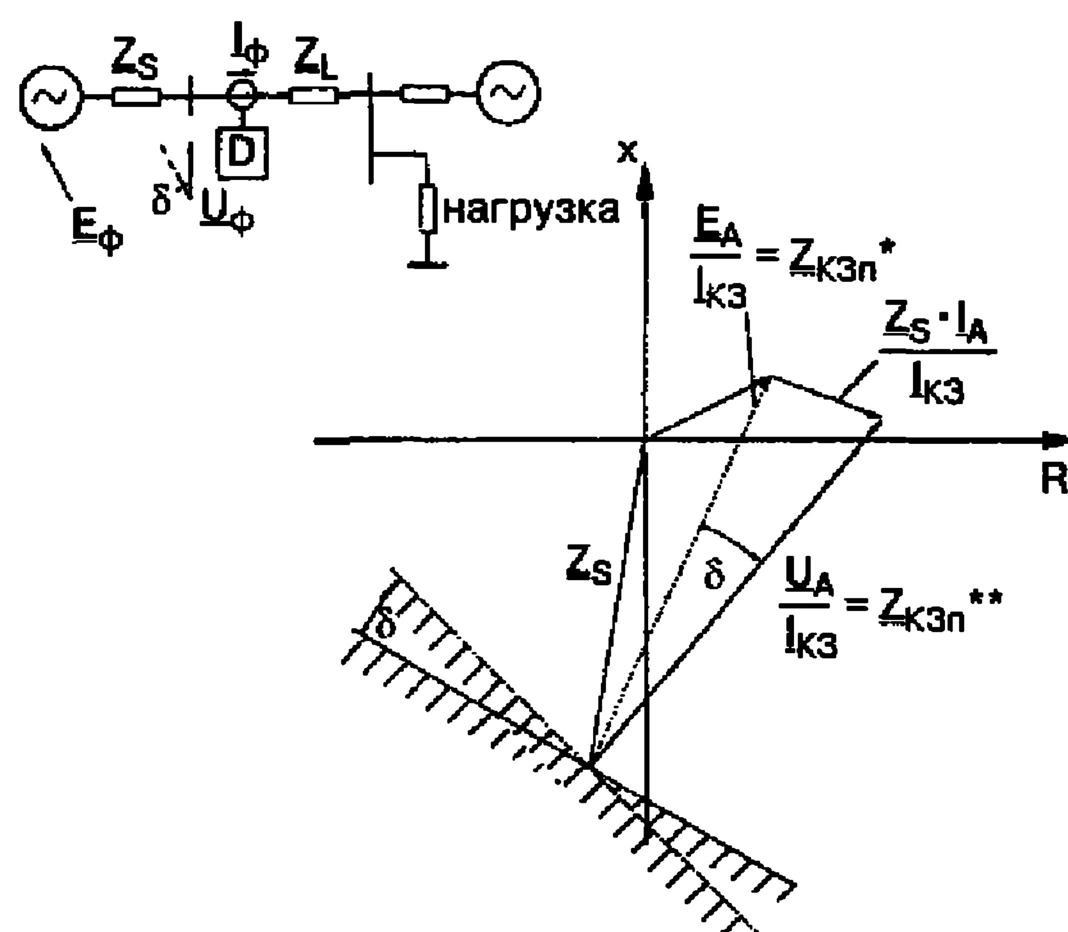


Рис. 3.79. Влияние протекания токов нагрузки на характеристику направленности

На коротких линиях с сильным источником питания этот эффект относительно мал (в Германии, например, <10°). На длинных, сильно нагруженных линиях стационарный угол передачи может достигать 60°, и это необходимо учитывать при расчётах. По этой причине характеристика направленности дистанционной защиты сверхвысокого напряжения была оптимизирована. В частности, был предусмотрен больший угол запаса для лучшей отстройки от замыканий в обратном направлении с большим углом поворота (рис. 3.80).

Поведение на длинных линиях электропередачи представлено на рис. 3.81.

Очевидно, что при замыканиях в обратном направлении возникает большое расхождение фаз между ЭДС источника и напряжением в месте установки реле. Последнее соответствует напряжению неповреждённых фаз или запомненному напряжению. Различие особенно велико при возникновении замыканий в обратном направлении (β и δ), когда ЭДС на противоположном конце вызывает подпитку места КЗ. Несмотря на угол поворота приблизи-

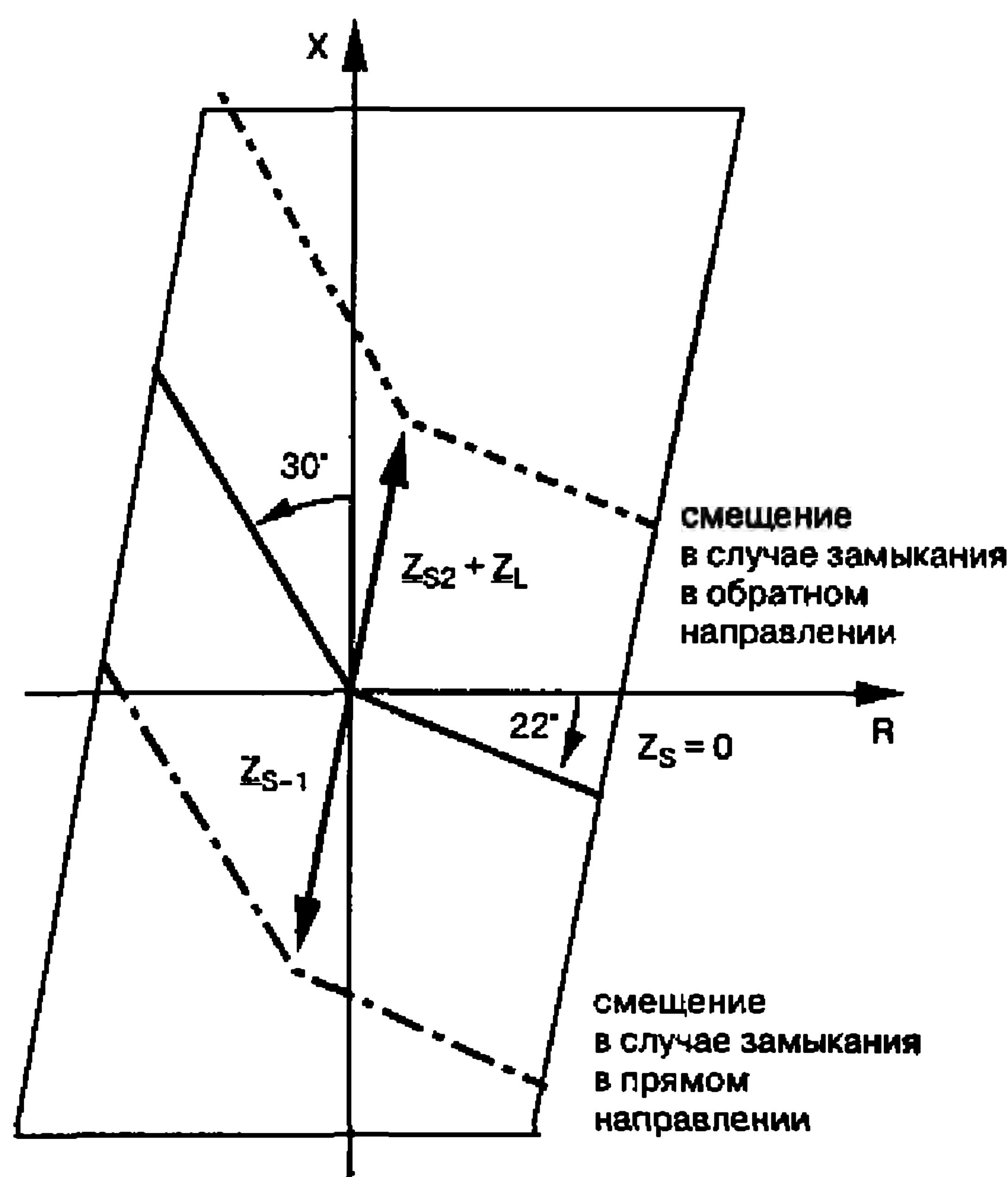


Рис. 3.80. Оптимизированная характеристика направленности для защиты линий сверхвысокого напряжения (7SA522)

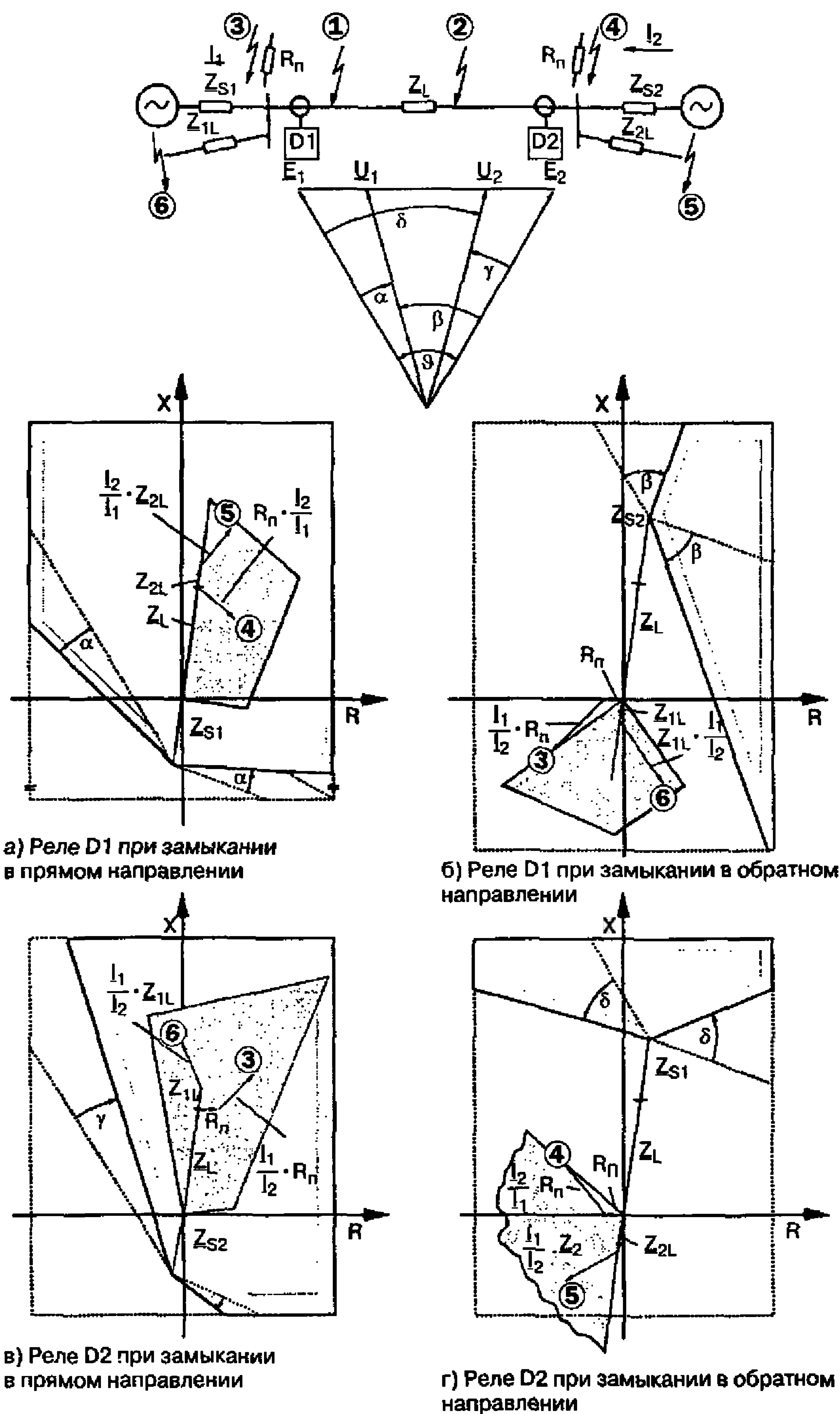


Рис. 3.81. Определение направления замыкания на длинных линиях электропередачи с использованием напряжений неповрежденных фаз

тельно в 45°, направление в любом случае определяется правильно.

Особый интерес вызывает точка короткого замыкания (4), когда из-за влияния переходного сопротивления $R_п$ и промежуточной подпитки I_2/I_1, сопротивление контура короткого замыкания попадает во вторую четверть (см. рис. 3.81, *г*). Это происходит потому, что ток короткого замыкания I_2, обусловленный источником E_2, отстаёт от тока I_1, обусловленного источником E_1, приблизительно на угол 60°. Традиционные «самополяризующиеся МНО—реле», или реле, использующие в качестве поляризующего напряжение повреждённых фаз, и плоскую характеристику неверно сработают при этом замыкании в обратном направлении.

3.3.6. Применение «памяти» напряжений

Запоминание напряжений имеет особое значение при близких трехфазных КЗ и на воздушных линиях с продольной компенсацией. В отличие от аналоговых реле, где запоминание напряжений было возможно лишь в течение нескольких периодов, современные цифровые реле могут сохранять значение напряжения поляризации так долго, как это необходимо.

Однако длительное сохранение напряжения поляризации требует частотной компенсации. Поскольку любое отклонение частоты системы повлечёт за собой угловое изменение характеристики направленности, пропорциональное $\Delta f \cdot t$. Поэтому, например, в дистанционных реле 7SA522 и 7SA6, длительность памяти которых составляет 2 с, такая компенсация обеспечивается.

В случае, когда в момент перезаписи измеряемое напряжение отсутствует, последнее определение направления сохраняется до тех пор, пока измеряемое напряжение не восстановится. Это гарантирует быстрое отключение после неуспешного АПВ в случае близкого замыкания с $U = 0$.

Высокая чувствительность (приблизительно 100 мВ), необходимая для сокращения «мертвой зоны» в традиционных реле, не требуется в цифровых реле, т. к. всегда можно воспользоваться напряжением, сохранённым в памяти.

Для определения направления в цифровых реле пороговое напряжение устанавливается на уровне 1 В (линейное напряжение). Оно соответствует значению, которое гарантирует достаточную помехоустойчивость. Если при определении направления ни текущее, ни запомненное напряжение не превышают указанного порога, то автоматически определяется прямое направление.

Поэтому при включении на КЗ с $U_{КЗ} = 0$ отключение происходит мгновенно. Более того, может быть разрешено действие ненаправленной ступени или пусковой ступени на отключение при помощи дополнительной логики отключения. Другие дистанционные реле на линиях, подключённых к той же системе шин, правильно распознают замыкание, как находящееся в обратном направлении, с помощью своих сохранённых в памяти значений напряжения. В случае отключения КЗ с выдержкой времени, большей, чем длительность сохранения напряжения, решение относительно определяемого замыкания в обратном направлении сохраняется до тех пор, пока измеряемое напряжение не восстановится после отключения замыкания.

На линиях с последовательной компенсацией запоминание напряжений требуется для учёта эффекта изменения (инвертирования) фазы напряжения на противоположную. В этом случае длительность сохранения записанного напряжения долж-

на быть больше, чем время устранения замыкания. При отключении без выдержки времени требуется память в течение приблизительно 100 мс.

Современные цифровые реле (например, 7SA522) имеют память до 2 с и, следовательно, могут отключать такие повреждения даже резервными ступенями.

3.3.7. Адаптивное определение направления

Предыдущие рассуждения показали следующее:

Определение направления с помощью напряжения поврежденной фазы (напряжения петли КЗ) ограничено количеством контуров. Его действие поэтому легко предугадать даже в случае многократных повреждений. Его можно использовать пока напряжение КЗ выше, чем 10 % номинального (расчетного) напряжения. Как бы то ни было, это должно быть использовано в случае трехфазного короткого замыкания, когда напряжение памяти истекло или недоступно (включение на КЗ).

Использование напряжения здоровых фаз для определения направления (кросс-поляризация) имеет преимущество в том, что короткие замыкания в прямом направлении с напряжением, близким к нулю, могут быть абсолютно распознаны. Поэтому это идеально подходит для всех видов повреждений.

Запоминание напряжения гарантирует

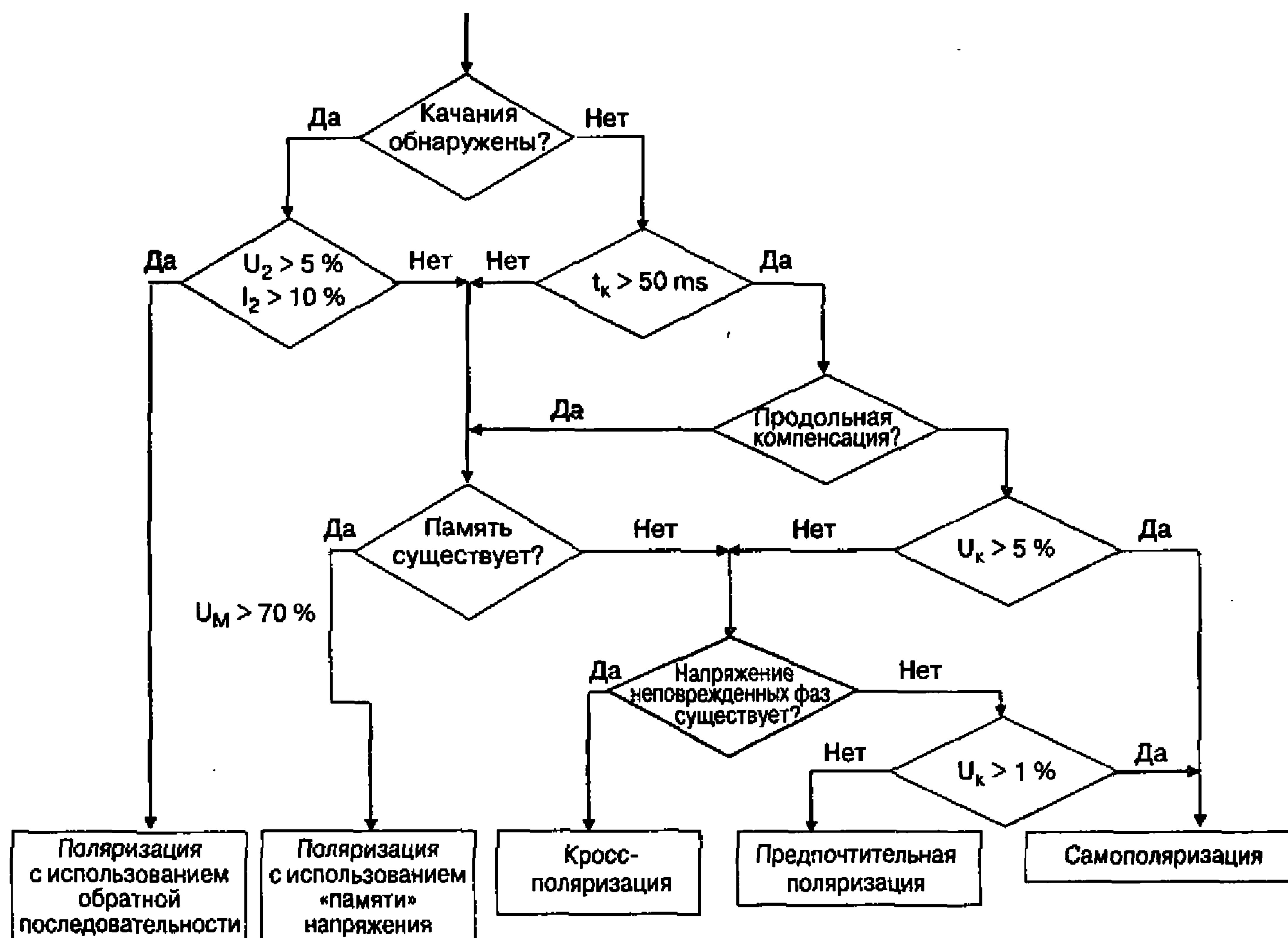


Рис. 3.82. Упрощенный алгоритм адаптивной поляризации реле 7SA6

определение направления также в случае трехфазного КЗ с напряжением, равным нулю (близкие КЗ). Также есть преимущество в том, что оно не подвержено влиянию переходных процессов, существующих при возникновении КЗ. Следовательно, оно может быть использовано, главным образом, в первые периоды после возникновения КЗ (50 мс в случае 7SA522 и 7SA6). Синхронизация с системной частотой также необходима и современна.

В случае сильно нагруженных линий сложно определить направление, когда угол передачи превышает 60 градусов. Контроль по критерию направленности обратной последовательности можно использовать либо всегда, либо только в случае обнаруженных качаний мощности.

Линии с продольной компенсацией в любом случае требуют как полную кросс-поляризацию, так и поляризацию с памятью напряжения.

Современные цифровые дистанционные реле используют метод адаптивной поляризации и выбирают наиболее подходящее напряжение поляризации в зависимости от системных условий (установленных параметров), повреждения, величины напряжения и времени, прошедшего с момента возникновения КЗ.

На рис. 3.82 представлена упрощенная логика выбора способа поляризации реле 7SA6.

3.4. Круговые характеристики цифровых устройств

При использовании многоугольных характеристик значения *R* и *X* полного сопротивления цепи короткого замыкания предварительно рассчитываются, а затем определяется их положение относительно зон срабатывания ступеней защиты путем сравнения с границами зон.

При использовании характеристик в виде окружностей, рекомендуется классическое измерение фаз тока и напряжения. В качестве примера ниже рассматриваются МНО характеристики, которые служат альтернативой многоугольным характеристикам в реле 7SA522.

3.4.1. Основная форма круговой характеристики срабатывания (МНО-окружность)

Данная характеристика, как уже было показано на рис. 3.10 в п.п. 3.1.4, представляет собой окружность, проходящую через начало координат.

В цифровых реле возможно использование тех же величин, что и в традиционных, но в виде векторов, представленных в форме комплексных чисел с действительной и мнимой частью, которые получаются после обработки фильтрами ортогональных составляющих. Они могут быть подвергнуты дальнейшим преобразованиям, проводимым по правилам действий с комплексными числами.

На рис. 3.83 рассматриваемая характеристика представлена на диаграмме сопротивлений или напряжений. Последняя получается после умножения сопротивлений на ток короткого замыкания.

Представленные характеристики называют «самополяризованными» МНО-окружностями, поскольку они выполняются с использованием в качестве опорных напряжений повреждённых фаз. Применение напряжений неповреждённых фаз (поляризованные МНО-окружности) будет рассмотрено ниже.

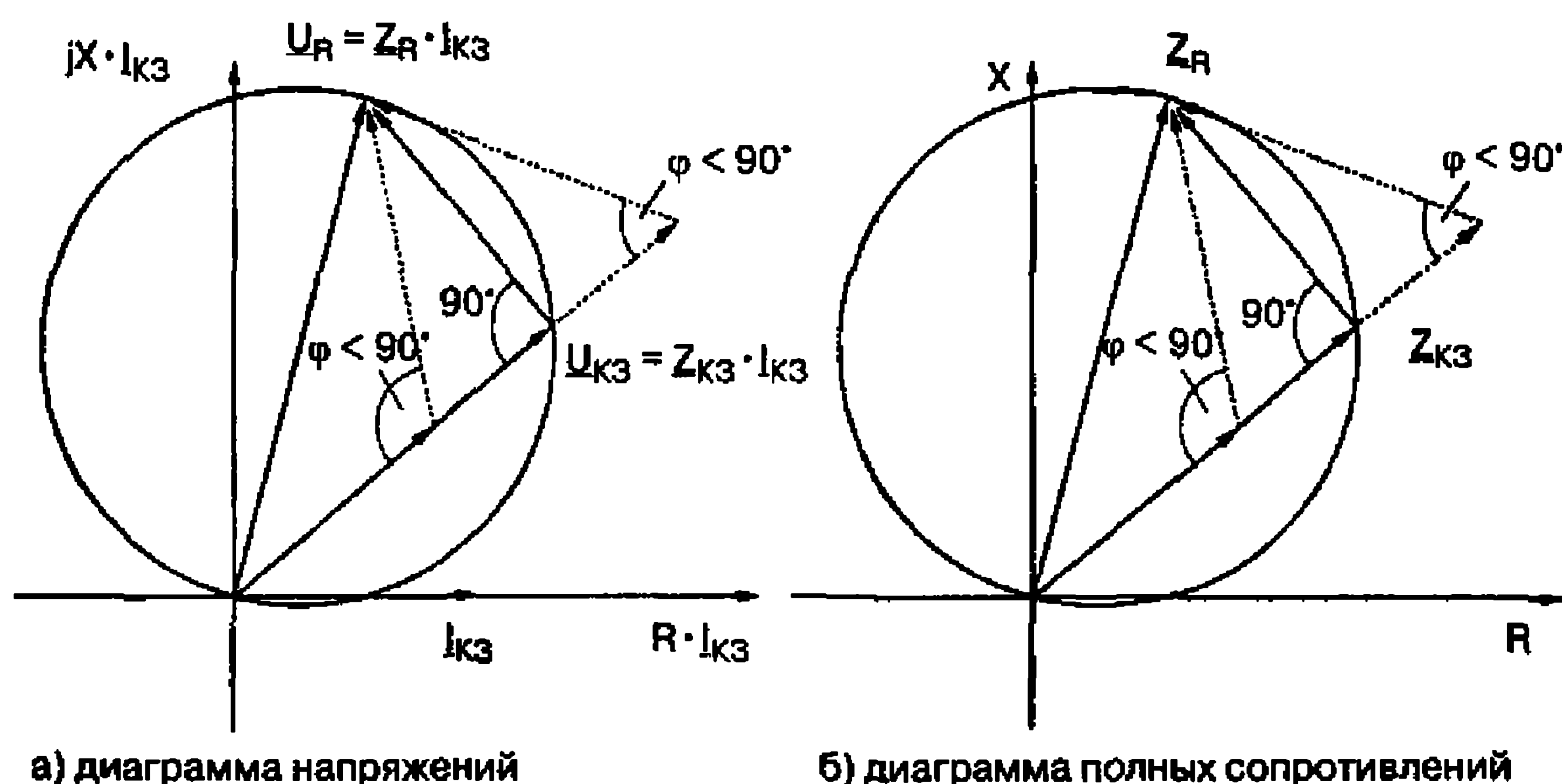


Рис. 3.83. «Самополяризованная» МНО-характеристика

Значение $\underline{Z}_R$ является уставкой реле. Оно соответствует диаметру окружности и определяет зону действия защиты. Обычно, $\underline{Z}_R$ соответствует полному сопротивлению защищаемой зоны. И имеет угол наклона, равный углу сопротивления линии (или близкий к нему) Поэтому $\underline{Z}_R$ может рассматриваться как модель сопротивления линии.[1]

Напряжение на сопротивлении $\underline{Z}_R$ определяется путём умножения его значения на ток короткого замыкания: $\underline{U}_R = \underline{I}_{КЗ} \cdot \underline{Z}_R$ (В традиционных реле вторичный ток трансформаторов тока должен подводиться к действительной модели, чтобы получить это.)

$\underline{Z}_{КЗ}$ — полное сопротивление короткого замыкания, которое должно быть измерено. $\underline{U}_{КЗ}$ — падение напряжения на $\underline{Z}_{КЗ}$, т. е. напряжение короткого замыкания в месте установки реле.

[1] В традиционной технологии было важно совпадение углов сопротивлений модели и защищаемой линии, т.к. это позволяло снизить влияние постоянной составляющей тока. В цифровых реле постоянная составляющая удаляется с помощью предварительной цифровой фильтрации. Поэтому возможно использование меньшего угла $\underline{Z}_R$ для получения запаса при появлении сопротивления дуги.

Разность напряжений $\Delta\underline{U}$ получается путем цифрового вычитания векторов $\underline{U}_{КЗ}$ и $\underline{U}_R$.

Круговая характеристика определяет все значения $\underline{Z}_{КЗ}$, при которых угол между $\underline{U}_{КЗ}$ и $\Delta\underline{U}$ равен 90°.

При внутренних КЗ $\varphi \geqslant 90°$, при внешних $\varphi < 90°$.

Критерий срабатывания $\varphi \geqslant 90°$ выполняется, когда $Re\{\underline{U}_{КЗ} \cdot \Delta\underline{U}\} \geqslant 0$, что может быть проверено расчётом на микропроцессорном устройстве.

Наряду с оценкой отдельных контуров замыкания, должны быть проведены расчёты соответствующих значений $\underline{U}_{КЗ}$ и $\underline{I}_{КЗ}$ (см. п.п. 3.2.2).

Междуфазное замыкание:

$\underline{U}_{КЗ} = \underline{U}_{ф1} - \underline{U}_{ф2}$ и $\underline{I}_{КЗ} = \underline{I}_{ф1} - \underline{I}_{ф2}$

Замыкание на землю:

$\underline{U}_{КЗ} = \underline{U}_{ф\text{-}E}$ и $\underline{I}_{КЗ} = \underline{I}_{ф} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_E$; $\underline{k}_0 = \underline{k}_E$

Комплексное значение

$$\underline{k}_0 = |\underline{k}_0| \cdot e^{j\varphi_E} = \mathrm{Re}\{\underline{k}_0\} + j\mathrm{Im}\{\underline{k}_0\} = = \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L} = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{3 \cdot \underline{Z}_1} \quad (3.59)$$

$\underline{k}_0$ — комплексный коэффициент компенсации тока нулевой последовательности. В традиционных реле устанавливалось абсолютное значение и фаза.

В цифровых дистанционных реле фирмы «Siemens» должны быть заданы следующие значения коэффициентов компенсации

$$k_{RE} = \frac{R_E}{R_L} = \frac{R_0 - R_1}{3 \cdot R_1} \quad \text{и}$$

$$k_{XE} = \frac{X_E}{X_L} = \frac{X_0 - X_1}{3 \cdot X_1}, \qquad (3.60)$$

т.к. они необходимы для вычислений R и X (см. 3.2.3.). *При этом комплексные вычисления не требуются*, что является дополнительным преимуществом.

Для МНО — характеристики в реле 7SA522 может быть выполнен расчет комплексного значения $\underline{k}_0$ по следующему выражению:

$$\underline{k}_0 = \frac{(k_{RE} \cdot R_1 + jk_{XE} \cdot X_1) \cdot (R_1 - jX_1)}{R_1^2 + X_1^2} \qquad (3.61)$$

Для его вычисления необходимо значение полного сопротивления защищаемой части данной линии. В этом реле уставки коэффициента компенсации нулевой последовательности для первой ступени и для резервных могут быть заданы отдельно. Уставка первой ступени обычно соответствует только защищаемой линии, тогда как уставки резервных зон должны учитывать сопротивления соседних линий или параллельных (см. пример в 7.2).

3.4.2. Поляризованная МНО—характеристика

Рассмотренные выше реле имеют «мертвую зону» при близких замыканиях ($\underline{Z}_{КЗ} \to 0$, $\underline{U}_{КЗ} \to 0$), т. к. характеристика срабатывания проходит через начало координат. При близких замыканиях с небольшим напряжением КЗ невозможно точно определить, где находится повреждение. Возникает та же проблема, что и при определении направления с помощью напряжений повреждённых фаз. Вдобавок, необходимо заметить, что время срабатывания реле при близких замыканиях несколько увеличивается, т. к. сопротивление замыкания находится на границе характеристики срабатывания. В электромеханических реле это происходило из-за того, что небольшое напряжение короткого замыкания создавало небольшой крутящий момент. В цифровых реле возникнут многократно *повторяющиеся измерения*, вызывающие аналогичный эффект, особенно, при наложении на измеряемое напряжение помех, обусловленных переходными процессами, аналогичными тем, которые возникают в цепях ёмкостных трансформаторов (делителей) напряжения (см. 5.1.3).

Как и в случае с определением направления, эта проблема может быть решена с помощью использования соответствующего напряжения неповреждённых фаз или запомненного напряжения.

Напряжение неповреждённых фаз суммируется с напряжением короткого замыкания для получения комбинированного напряжения поляризации $\underline{U}_п$. Доля прибавляемого напряжения неповреждённых фаз определяется коэффициентом $k_п$:

$$\underline{U}_п = (1 - k_п) \cdot \underline{U}_{повр} + k_п \cdot \underline{U}_{неповр}. \qquad (3.62)$$

Амплитуда и фаза прибавляемого напряжения «здоровой фазы» изменяется перед суммированием, так что оно равняется напряжению на контуре короткого замыкания до возникновения короткого замыкания.

В качестве примера рассмотрим однофазное КЗ $K_A^{(1)}$ (A-E) в прямом направлении. В качестве поляризующего используется линейное напряжение «противопо-

ложных» фаз $\underline{U}_{BC}$ (напряжение кросс-поляризации), как и при определении направления по напряжению неповреждённых фаз (см. 3.3.2).

Линейное напряжение должно быть повернуто на 90° в положительном направлении и поделено на $\sqrt{3}$, так чтобы оно соответствовало фазному напряжению $\underline{U}_{A-E}$, существовавшему до возникновения замыкания.

$$U_{\text{неповр}} = 1/\sqrt{3} \cdot e^{-j90^\circ} \cdot (\underline{U}_B - \underline{U}_C) \qquad (3.63)$$

В неповреждённой симметричной трёхфазной системе выполняется следующее:

$$\underline{U}_\text{п} = \underline{U}_{A\text{-}E}$$

Для расчёта $\underline{U}_\text{п}$ при коротком замыкании предполагается, что линия не нагружена. В соответствии с рис. 3.73, *б* можно использовать следующие соотношения.

$$\underline{E}_A = \underline{U}_{\text{КЗ-}A} + \underline{Z}_S \underline{I}_{\text{КЗ-}A} \qquad (3.64)$$

и

$$\underline{E}_B - \underline{E}_C = \underline{E}_A \cdot \sqrt{3} \cdot e^{-j90^\circ} =$$
$$= (\underline{U}_{\text{КЗ-}A} + \underline{Z}_S \underline{I}_{\text{КЗ.-}A}) \sqrt{3} \cdot e^{-j90^\circ} \qquad (3.65)$$

Принимая во внимание тот факт, что на ненагруженной линии $\underline{U}_B - \underline{U}_C = \underline{E}_B - \underline{E}_C$, получаем следующие выражения:

$$\underline{U}_{\text{неповр}} = \underline{U}_{\text{КЗ.-}A} + \underline{Z}_S \underline{I}_{\text{КЗ.-}A} \qquad (3.66)$$

$$\underline{U}_{\text{повр}} = \underline{U}_{\text{КЗ.-}A} = \underline{Z}_{\text{КЗ}} \underline{I}_{\text{КЗ.-}A} \qquad (3.67)$$

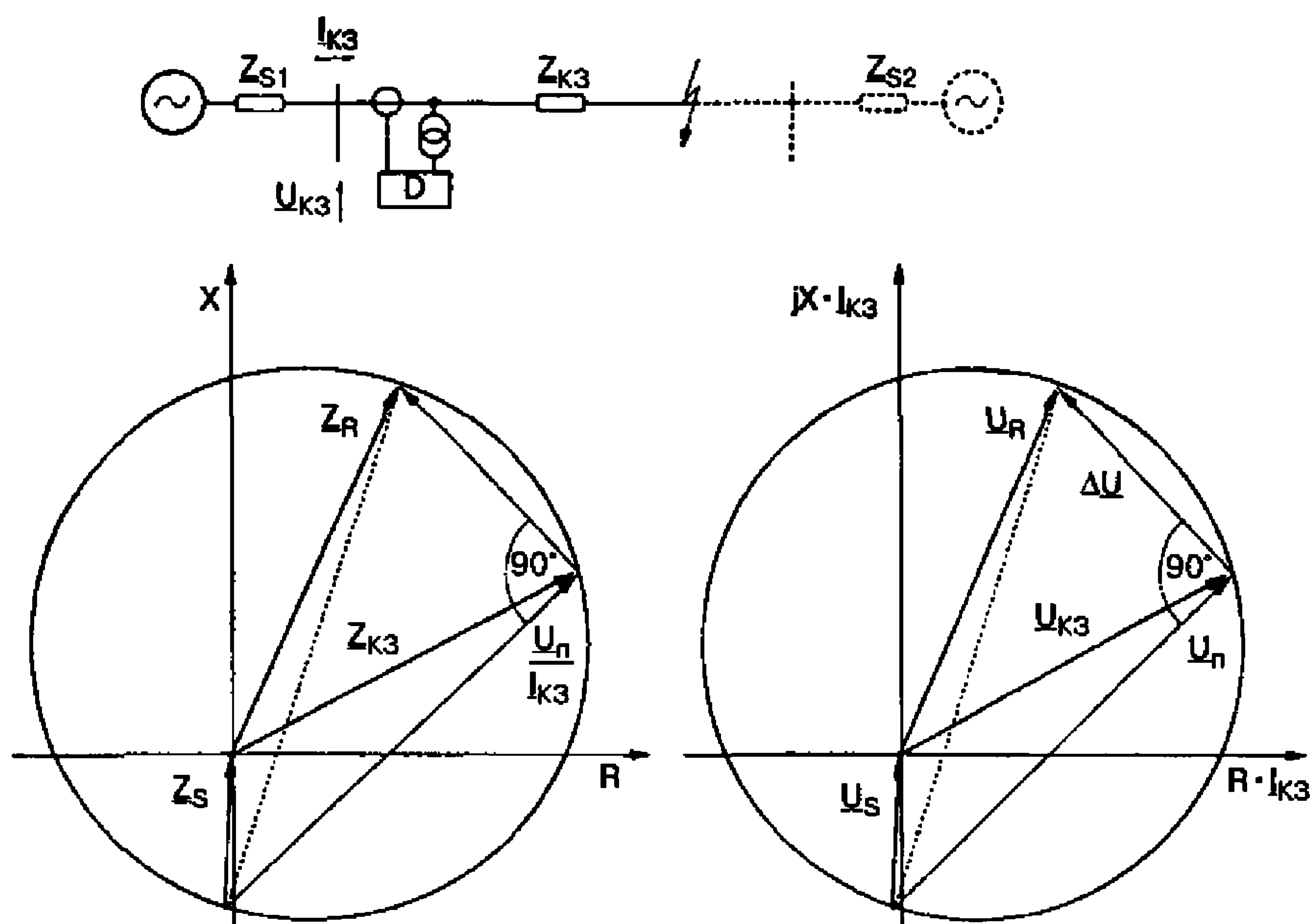
Получаем следующее выражение для напряжения поляризации:

$$\underline{U}_\text{п} = (1 - \underline{k}_\text{п}) \cdot \underline{Z}_{\text{КЗ}} \underline{I}_{\text{КЗ-}A} + \underline{k}_\text{п} \cdot (\underline{U}_{\text{КЗ-}A} + \underline{Z}_S \underline{I}_{\text{КЗ-}A}) \qquad (3.68)$$

В итоге:

$$\underline{U}_\text{п} = \underline{Z}_{\text{КЗ}} \underline{I}_{\text{КЗ-}A} + \underline{k}_\text{п} \underline{Z}_S \underline{I}_{\text{КЗ-}A} \qquad (3.69)$$

Влияние на МНО характеристики представлено на рис. 3.84. Благодаря тому,



а) диаграмма полных сопротивлений б) диаграмма напряжений

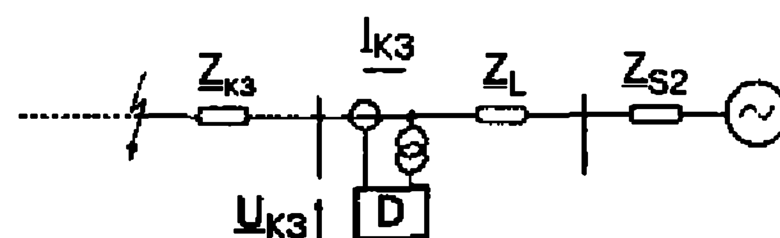
Рис. 3.84. Смещенная (поляризованная) круговая характеристика для замыкания в прямом направлении

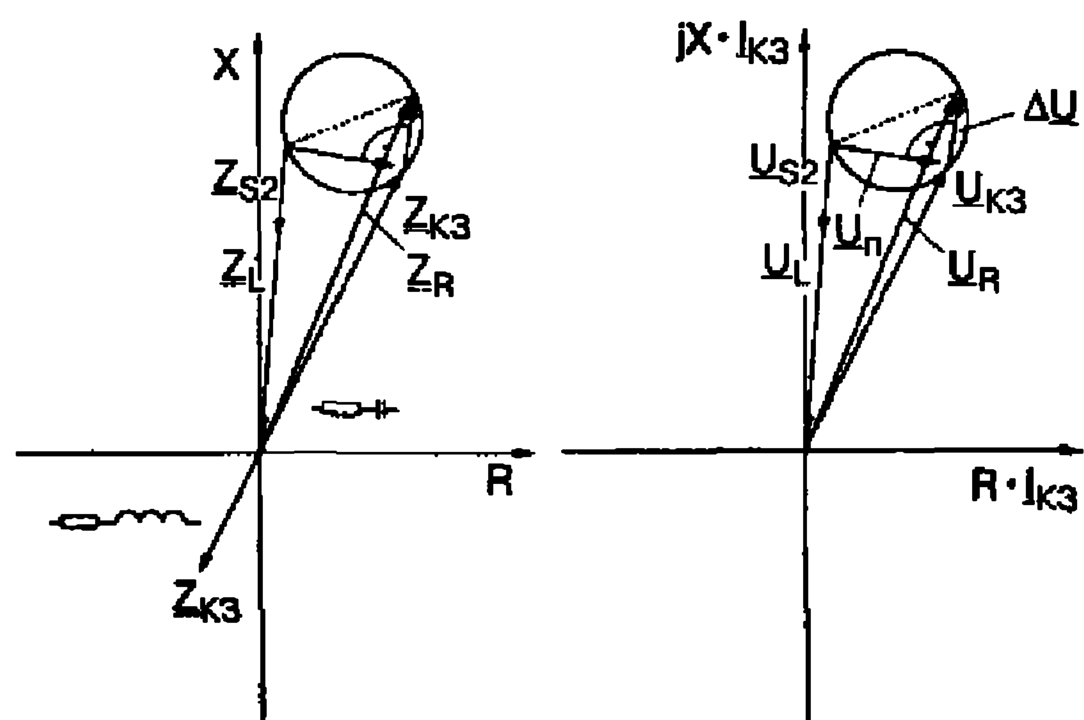
что измеряется угол между $\Delta\underline{U}$ и $\underline{U}_п$ вместо угла между $\Delta\underline{U}$ и $\underline{U}_{КЗ}$, размер окружности увеличивается, точка начала координат попадает внутрь окружности.

Необходимо заметить, что это представление можно использовать только для замыканий в прямом направлении. Отрицательные значения X не соответствуют замыканию в обратном направлении. Они означают то, что при отрицательном измеренном значении реактивного сопротивления замыкание определяется в прямом направлении. Это возможно, если сопротивление короткого замыкания имеет ёмкостной характер ($\underline{X}_{КЗ}= -X_C$), т. е. замыкание находится за УПК. Правильное определение КЗ в прямом направлении возможно, если выполняется условие $X_C < k_п \cdot X_S$, т. к. измеренное реактивное сопротивление короткого замыкания остаётся внутри окружности вплоть до этого граничного значения (см. п.п. 3.5.6).

В случае замыканий в обратном направлении, токи КЗ в цепях защиты изменяют свое направление относительно напряжения. Соответственно, в выражениях, приведенных выше, ток должен иметь отрицательный знак, что меняет характеристику реле. Поэтому для замыканий в обратном направлении должна быть составлена отдельная диаграмма.[1]

Также необходимо принять во внимание то, что при таком представлении диаграмм вектора сопротивлений при КЗ в обратном направлении попадают в третий квадрант, так же как и на диаграммах «самополяризованных» характеристик. Вектор полного сопротивления короткого замыкания и вектор сопротивления источника имеют разные направления (рис. 3.85). Окружность поляризованной МНО-характеристики уменьшена и смещена в I квадрант.





а) диаграмма полных сопротивлений а) диаграмма напряжений

Рис. 3.85. Поляризованная МНО-характеристика для замыкания в обратном направлении

Близкие замыкания в обратном направлении ($Z \approx 0$) теперь располагаются вне окружности и правильно распознаются. Даже замыкания за последовательными компенсаторами в обратном направлении, которые обладают положительным реактивным сопротивлением, правильно распознаются, если выполняется условие $X_C < k_п \cdot (X_{S2} + X_L)$.

Таким образом, реле с характеристиками в виде поляризованных МНО-окружностей (т. е. со смещенными круговыми характеристиками) точно определяют направление замыкания, также как и реле с характеристиками срабатывания в виде многоугольников, которые определяют направление замыкания с помощью напряжений неповреждённых фаз.

[1] Отдельные диаграммы для замыканий в прямом и обратном направлении должны использоваться и для «самополяризованных» характеристик. Однако это не делается, т.к. характеристика не изменяется при смене направления тока.

Дополнительным преимуществом поляризованных МНО-характеристик по сравнению с «самополяризованными» МНО характеристиками является возможность значительного расширения защищаемой зоны в направлении R (возможность охвата КЗ через сопротивление дуги). Однако, размер окружности зависит от значения полного сопротивления источника. При возрастнии сопротивления источника относительно уставки ступени, увеличивается компенсация сопротивления дуги (см. рис. 3.8).

Это является положительным моментом, т. к. увеличение сопротивления источника питания ведет к уменьшению токов КЗ и к увеличению сопротивления дуги.

При мощных источниках питания эффект, однако, существенно снижается, и в этом случае рекомендуется применять на коротких линиях реле с многоугольными характеристиками.

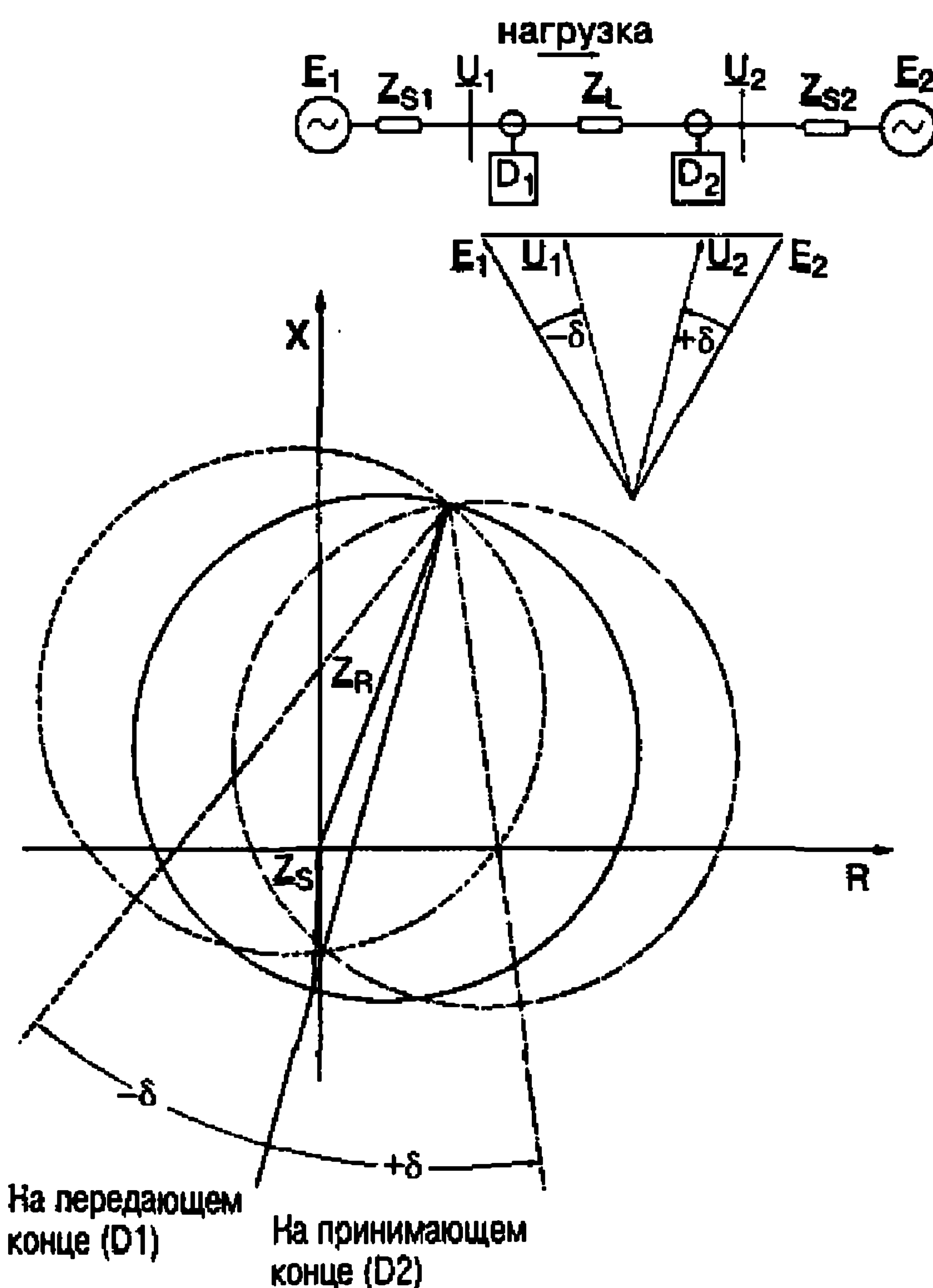


Рис. 3.86. Влияние токов нагрузки на положение поляризованной МНО-характеристики (полная поляризация напряжением неповрежденных фаз)

3.4.3. Влияние нагрузки на работу РС с поляризованными МНО-окружностями

Протекание токов нагрузки оказывает то же влияние на поляризованные МНО характеристики, что и на определение направления. Угловой сдвиг напряжения в месте установки реле относительно ЭДС источника равен δ°. На конце, передающем активную мощность, напряжение неповреждённой фазы или напряжение, занесенное в память, U_1 отстаёт от ЭДС источника E_1, как показано на рис. 3.86. *Обратимся ещё раз к однофазному КЗ на* землю $K_A^{(1)}$, рассмотренному выше для ненагруженной линии (см. рис. 3.73).

Справедливы следующие соотношения:

$$\underline{E}_A = \underline{U}_{КЗ\text{-}A} + \underline{Z}_S \underline{I}_{КЗ\text{-}A} \qquad (3.70)$$

и

$$\underline{E}_B - \underline{E}_C = \underline{E}_A \cdot \sqrt{3} \cdot e^{-j90^\circ} = (\underline{U}_{КЗ\text{-}A} + \underline{Z}_S \underline{I}_{КЗ\text{-}A})\sqrt{3} \cdot e^{-j90^\circ}. \qquad (3.71)$$

Из-за углового сдвига напряжений «здоровых» фаз получаем следующее соотношение:

$$\underline{U}_B - \underline{U}_C = (\underline{E}_B - \underline{E}_C) \cdot e^{-j\delta^\circ}. \qquad (3.72)$$

Напряжение неповреждённых фаз:

$$\underline{U}_{неповр} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j90^\circ} \cdot (\underline{U}_B - \underline{U}_C) = (\underline{U}_{КЗ\text{-}A} + \underline{Z}_S \cdot \underline{I}_{КЗ\text{-}A}) \cdot e^{-j\delta^\circ}. \qquad (3.73)$$

Напряжение короткого замыкания не изменяется:

$$\underline{U}_{повр} = \underline{U}_{КЗ\text{-}A} = \underline{Z}_{КЗ} \cdot \underline{I}_{КЗ\text{-}A}. \qquad (3.74)$$

Напряжение поляризации:

$$\underline{U}_п = (1 - k_п) \cdot \underline{U}_{повр} + k_п \cdot \underline{U}_{неповр}$$

$$\underline{U}_п = [(1 - k_п) + k_п \cdot e^{-j\delta}] \cdot \underline{Z}_{КЗ} \cdot \underline{I}_{КЗ\text{-}A} + $$
$$+ k_п \cdot e^{-j\delta} \cdot \underline{Z}_S \cdot \underline{I}_{КЗ\text{-}A}. \qquad (3.75)$$

В случае полной компенсации напряжением неповреждённой фазы ($k_п$ = 1), получаем следующее выражение:

$$\underline{U}_п = (\underline{Z}_{КЗ} \cdot \underline{I}_{КЗ\text{-}A} + \underline{Z}_S \cdot \underline{I}_{КЗ\text{-}A}) \cdot e^{-j\delta}. \qquad (3.76)$$

Окружность поворачивается относительно наиболее удалённой точки характеристики, соответствующей концу вектора $\underline{Z}_R$, на угол δ в сторону отставания (рис. 3.86). При этом для питающего конца (D1) компенсация сопротивления дуги уменьшается.

На конце, принимающем энергию, окружность повернётся в сторону опережения и компенсация сопротивления дуги, соответственно, увеличится.

Определённым преимуществом является то, что на нагруженных линиях с двусторонним питанием поворот поляризованных МНО характеристик происходит в том же направлении, что и поворот сопротивления замыкания. Автоматически происходит компенсация погрешности измерения реактивной составляющей *X* и не требуется специальной компенсации нагрузки, как при использовании четырехугольных характеристик (см. 3.5.1).

Изменение угла нагрузки оказывает наибольшее влияние при замыканиях в обратном направлении, т. к. в этом случае имеет место наибольший фазовый сдвиг между напряжением источника питания и напряжением в месте установки реле. Это было представлено на рис. 3.81 для органа определения направления с использованием *напряжения неповреждённых фаз.*

Изменение поляризованных МНО характеристик при перемещении места КЗ в одних и тех же условиях работы системы представлено на рис. 3.87. Благодаря сокращению МНО-окружности обеспечивается надёжная селективность отключения в случае возникновения критически близких замыканий в обратном направлении.

3.4.4. МНО-окружности с «памятью» напряжений

Функция запоминания напряжения используется так же, как поляризация с помощью напряжений неповреждённых фаз. Отличие заключается только в том, что к напряжению короткого замыкания прибавляется часть запоминаемого напряжения, в результате получается напряжение поляризации $\underline{U}_п$.

В частности, это относится к реле 7SA522, в котором используются напряжения неповреждённых контуров, которые практически не изменяются при однофазных и трёхфазных замыканиях. Это означает, что всё описанное выше справедливо и здесь, включая зависимость от значения полного сопротивления источника питания и влияние нагрузки.

Запоминание напряжений имеет особое значение при близких трёхфазных КЗ, когда нет неповреждённых контуров. При этом, необходима относительно малая доля напряжения: (10—20) % $\underline{U}_{ном}$($k_п$ = 0,1—0,2).

Полная компенсация ($k_п$ = 1) необходима на линиях с УПК, где напряжение короткого замыкания может быть направлено в противоположную сторону относительно напряжения, занесённого в память. Для обеспечения селективности запоминае-

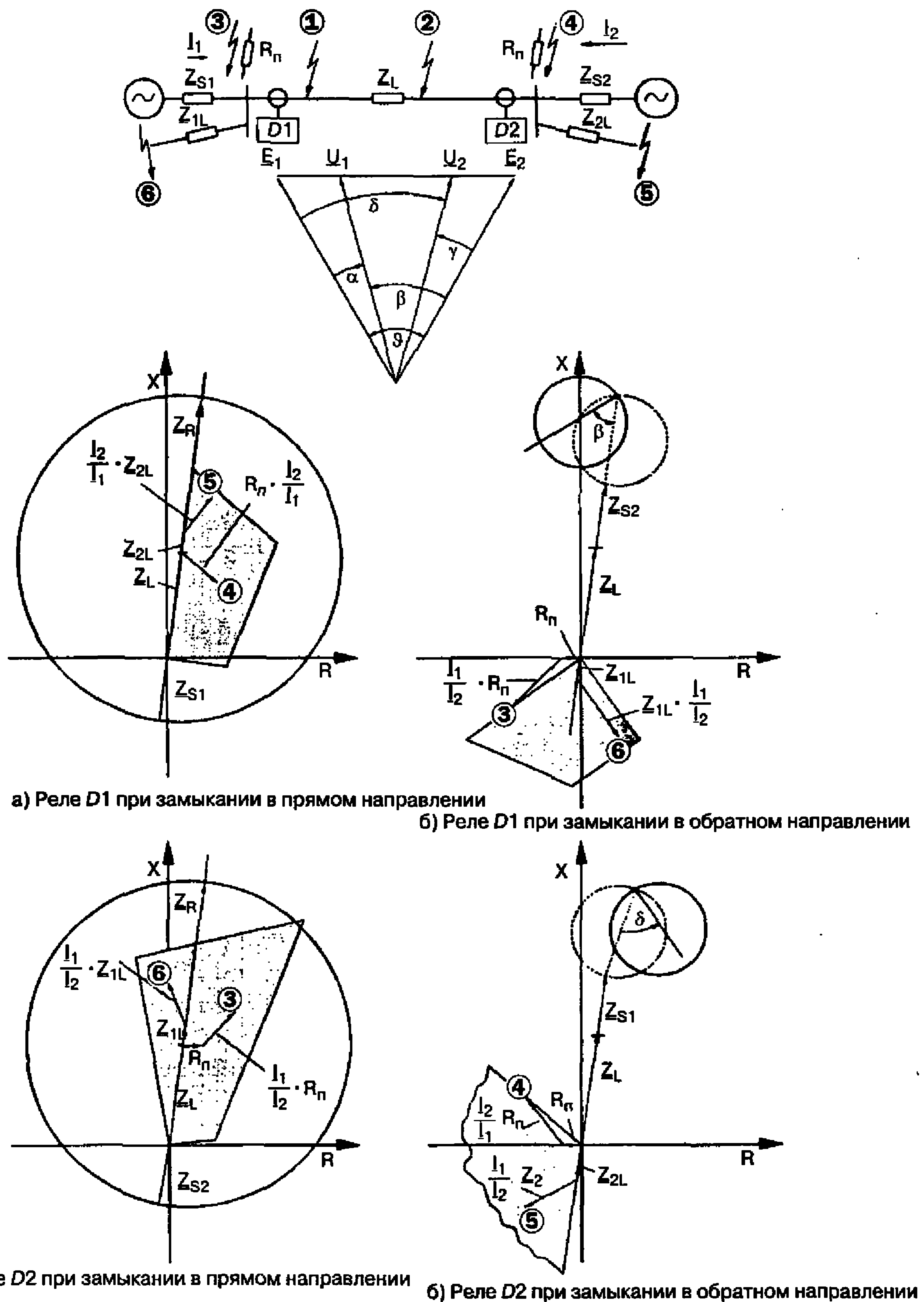


Рис. 3.87. Использование поляризованных МНО-характеристик в случае длинных линий электропередачи

мое напряжение должно быть больше, чем максимальное по модулю отрицательное напряжение короткого замыкания. В этом случае, для получения $\underline{U}_п$ используется 100 % запоминаемого напряжения. Правильное определение направления замыкания возможно, если $X_C < k_п \cdot X_S$, как и в случае применения напряжения неповрежденных фаз (см. 3.4.2).

3.5. Дистанционные измерения, влияющие факторы

При практическом применении дистанционной защиты необходимо рассмотреть несколько влияющих факторов. Они влияют на точность дистанционных измерений, (например, влияние нулевой *последовательности на параллельных* воздушных линиях) и на уставки ступеней защиты (учет сопротивления дуги).

Для лучшего понимания сначала рассмотрим физические основы этих явлений.

Практическое применение будет рассмотрено в главе 5.

3.5.1. Сопротивление в месте замыкания (переходное сопротивление)

Сначала определим различие между простым междуфазным замыканием и замыканием на землю в системе в одним источником питания.

Междуфазное КЗ с активным сопротивлением в месте повреждения

На рис. 3.88 представлена эквивалентная схема замещения участка сети.

Линейное напряжение короткого замыкания в месте установки реле определяется:

$$\underline{U}_{лин} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = 2 \cdot (\underline{R}_L \cdot \underline{I}_ф + j\underline{X}_L \cdot \underline{I}_ф) + \underline{R}_п \cdot \underline{I}_ф, \quad (3.77)$$

где $\underline{R}_п$ — переходное сопротивление в месте повреждения.

При подстановке (3.77) в выражение (3.38) с учётом того, что $\underline{I}_C = -\underline{I}_B = \underline{I}_ф$, можно получить следующее выражение для полного сопротивления замыкания:

$$\underline{Z}_{B\text{-}C} = \frac{2 \cdot (R_L \cdot \underline{I}_ф + jX_L \cdot \underline{I}_ф) + R_п \cdot \underline{I}_ф}{2 \cdot \underline{I}_ф}; \quad (3.78)$$

$$\underline{Z}_{B\text{-}C} = R_L + \frac{R_п}{2} + jX_L. \quad (3.79)$$

В результате убеждаемся в том, что значение X (расстояние до места замыкания) определяется правильно. В то же время переходное сопротивление делится пополам, по половине на каждую фазу. Следовательно, реле «видит» только половину этого сопротивления. Об этом необходимо помнить при определении значения активного сопротивления уставки ступени защиты.

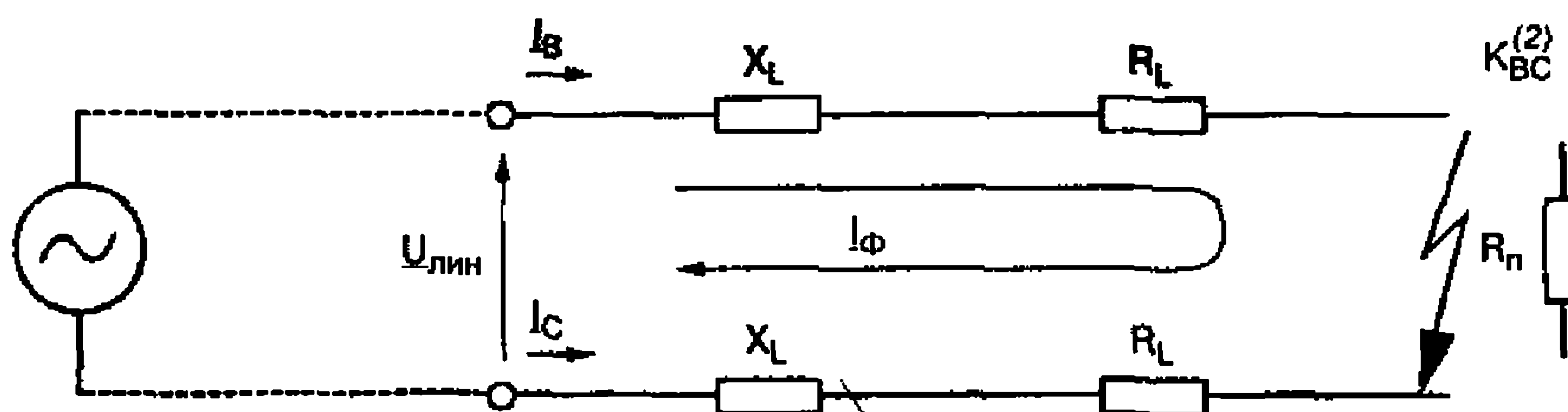


Рис. 3.88. Схема замещения цепи с односторонним питанием при двухфазном КЗ ($K_{BC}^{(2)}$) *через переходное сопротивление*

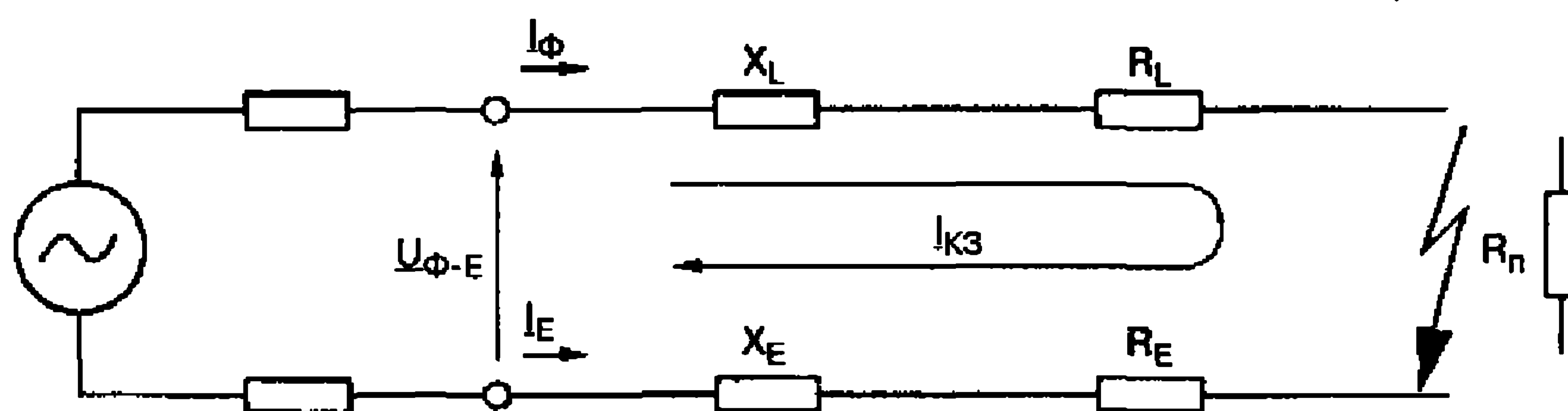


Рис. 3.89. Схема замещения цепи с односторонним питанием при однофазном КЗ ($K^{(1)}$) через переходное сопротивление

Однофазное КЗ на землю с активным переходным сопротивлением в месте КЗ

Эквивалентная схема замещения представлена на рис. 3.89.

Напряжение короткого замыкания в месте установки реле:

$$\underline{U}_{Ф\text{-}E} = \underline{I}_Ф \cdot (R_L + jX_L) + \underline{I}_E \cdot (R_E + jX_E) + \underline{I}_Ф \cdot R_п. \quad (3.80)$$

Из выражений (3.54) и (3.55) получаем:

$$X_{Ф\text{-}E} = \frac{X_L \cdot \left(\underline{I}_Ф + \frac{X_E}{X_L} \cdot \underline{I}_E\right)}{\underline{I}_Ф + \left(\frac{X_E}{X_L}\right)_{уст} \cdot \underline{I}_E}; \quad (3.81)$$

$$R_{Ф\text{-}E} = \frac{R_L \cdot \left(\underline{I}_Ф + \frac{R_E}{R_L} \cdot \underline{I}_E\right) + R_П \cdot \underline{I}_Ф}{\underline{I}_Ф + \left(\frac{R_E}{R_L}\right)_{уст} \cdot \underline{I}_E}. \quad (3.82)$$

Значения $\left(\frac{X_E}{X_L}\right)_{уст}$ и $\left(\frac{R_E}{R_L}\right)_{уст}$ равны уставке коэффициента компенсации нулевой последовательности в реле.

Если эти значения соответствуют параметрам защищаемой воздушной линии, то получаем следующее:

$$X_{Ф\text{-}E} = X_L; \quad (3.83)$$

$$R_{Ф\text{-}E} = R_L + \frac{R_п}{1 + \left(\frac{R_E}{R_L}\right)_{уст}}. \quad (3.84)$$

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания опять измеряется правильно, вне зависимости от величины активного переходного сопротивления в месте КЗ.

Активная составляющая переходного сопротивления в этом случае не превышает 50 % от измеренного значения, но зависит от установленного отношения $\frac{R_E}{R_L}$.

В общем случае, это отношение соответствует параметрам защищаемой линии.

Отношение $\frac{R_E}{R_L}$ сильно зависит от типа воздушной линии или кабеля (от 0,24 до 3,42, в соответствии с табл. 3.4)

При выборе уставки в R-направлении для реле 7SA это необходимо принять во внимание.

В предельном случае, когда коэффициент компенсации нулевой последовательности равен 3.42, активное сопротивление замыкания уменьшается в 1 + 3,42 = = 4,42 раза, т. е. при замыканиях на землю зона защиты существенно увеличится. Но это происходит только в том случае, если значение тока нулевой последовательности и фазного тока примерно равны. При неблагоприятном распределении тока нулевой последовательности в системе (см. рис. 3.15, п.п. 3.1.6), поправочный коэффициент может быть значительно ниже.

Замечание: При выборе уставок РС в направлении R необходимо учесть то, что действительный охват характеристики в этом направлении при $I_E = I_ф$ составит $R_д = \left(1 + \frac{R_E}{R_L}\right) R_{уст,E}$. Это может привести к излишнему расширению зоны, что опасно при внешних КЗ и перегрузках. Так, например, при $R_{уст,E} = 25$ Ом и $\frac{R_E}{R_L} = 3{,}0$ действительная зона действия при замыканиях на землю может достигнуть 100 Ом. Поэтому в инструкциях для реле 7SA рекомендуется ограничивать уставку $\frac{R_E}{R_L} \leqslant 2$, даже если это отношение для реальной линии в редких случаях окажется выше.

Сравнение с традиционной измерительной техникой

Преимуществом цифровой измерительной техники, основанной на решении линейных дифференциальных уравнений, является то, что активное сопротивление замыкания всегда правильно измеряется, даже если углы сопротивления прямой и нулевой последовательности не равны (φ_L и φ_0).

Это особенно важно в кабельных сетях, где эта разница может быть очень большой.

В традиционных измерительных устройствах компенсация нулевой последовательности вызывает изменение фазы тока нулевой последовательности. Это приводит к появлению индуктивной составляющей сопротивления замыкания, а, следовательно, к ошибкам в дистанционных измерениях. Для сравнения, вывод уравнений, используемых в традиционной измерительной технике, приведён ниже:

При $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ и

$$\underline{Z}_E = R_E + jX_E,$$

напряжение КЗ в месте установки реле определяется выражением:

$$\underline{U}_{ф\text{-}E} = \underline{I}_ф(\underline{Z}_L + \underline{Z}_E) + R_п \cdot \underline{I}_ф. \tag{3.85}$$

Подставляя в уравнение (3.29), получаем:

$$\underline{Z}_{ф\text{-}E} = \underline{Z}_L \cdot \frac{1 + \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}}{1 + \underline{k}_0} + \frac{R_п}{1 + \underline{k}_0}. \tag{3.86}$$

Если значение $\underline{k}_0$ соответствует параметрам линии $\underline{k}_0 = \frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}$, то получаем:

$$\underline{Z}_{ф\text{-}E} = \underline{Z}_L + \frac{R_п}{1 + \left(\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}\right)}; \tag{3.87}$$

$$\underline{Z}_{ф\text{-}E} = \underline{Z}_L + \frac{R_п}{1 + \left|\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}\right| \cdot e^{j(\varphi_E - \varphi_L)}}. \tag{3.88}$$

или

$$\underline{Z}_{ф\text{-}E} = \underline{Z}_L + \\ + \frac{1 + \left|\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}\right| \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_L) - j\left|\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}\right| \cdot \sin(\varphi_E - \varphi_L)}{1 + 2 \cdot \left|\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}\right| \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_L) + \left|\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}\right|^2} \times \\ \times R_п. \tag{3.89}$$

Числовой пример

Кабель:

$$\underline{Z}_L = 0{,}387 \cdot e^{j75{,}8}\ \text{Ом/км};$$

$$Z_0 = 0{,}332 \cdot e^{j21{,}3}\ \text{Ом/км}.$$

Сопротивление земли

$$\underline{Z}_E = \frac{1}{2}(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1) = 0{,}111 \cdot e^{-j49{,}9}\ \text{Ом/км}.$$

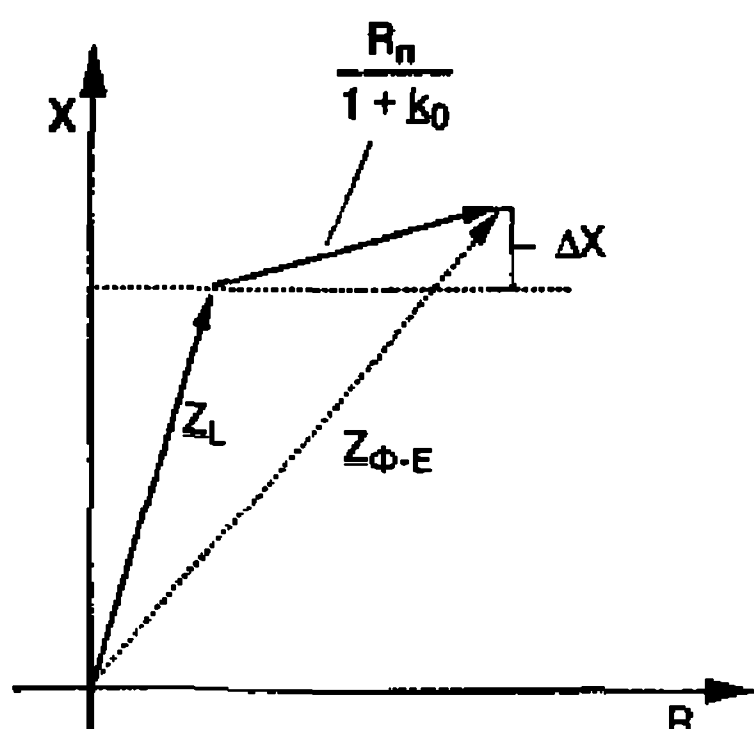


Рис. 3.90. Дистанционные измерения с использованием традиционной измерительной техники, погрешности измерения в кабельных сетях в случае замыкания с активным сопротивлением $R_п$ в месте замыкания ($\underline{k}_E$ - $\underline{k}_0$)

Получаем полное сопротивление замыкания:

$\underline{Z}_{Ф\text{-}E} = \underline{Z}_L + (1{,}11 + j0{,}31) \cdot R_п$.

Из-за индуктивной составляющей измеренное значение X слишком велико (рис. 3.90). В результате получаем недостаточный охват зоны защиты.

Что касается круговых характеристик, то переходное сопротивление оказывает влияние как на значение X (измеренное расстояние до места повреждения), так и на охватываемую зону в направлении R. Это показано на рис. 3.91 для «самополяризованного» реле сопротивления с характеристикой срабатывания в виде окружности.

Сопротивление $Z_{ф-E}$, измеренное с помощью реле согласно (3.87), соответствует точке на окружности реле сопротивления. Действительное же сопротивление Z_K лежит на характеристике «смещенного» эллипса.

Дуговая компенсация для текущей точки кабеля может быть определена с помощью проведения прямой линии от соответствующего вектор $\underline{Z}_L$ в направлении окружности реле сопротивления под углом $\alpha = \text{arctg}\,[1/1 + k_E]$, то есть 17,3° в примере. *Для получения значения* $R_п$ *необходимо* расстояние (сопротивление) от точки Z_L до окружности умножить на $(1 + k_E)$.

В этом примере мы также получаем пониженную дуговую компенсацию вдобавок к ожидаемому неполному охвату защищаемой зоны в X-направлении. Такой результат свойственен для кабелей с маленьким и, главным образом, резистивным сопротивлением нулевой последовательности.



Рис. 3.91. Характеристика срабатывания РС с МНО-окружностью при КЗ на землю на кабеле

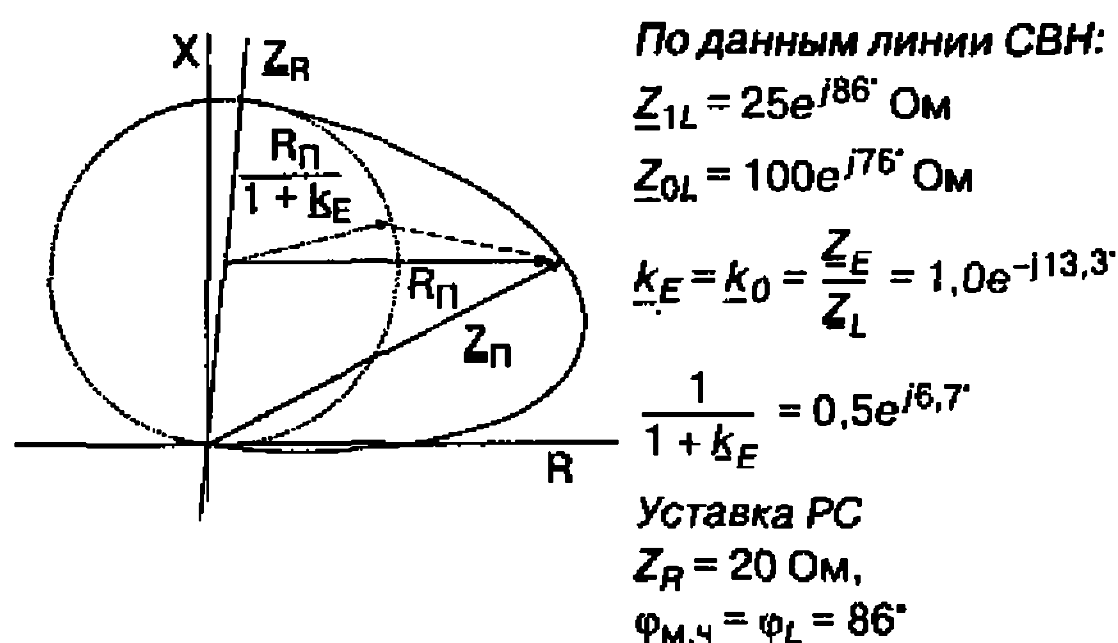


Рис. 3.92. Влияние дуги на характеристику срабатывания реле (МНО) при КЗ на землю на линиях СВН

Линии СВН имеют более высокое сопротивление нулевой последовательности (Z_{L0} = (3 – 5) Z_{L1}) при угле, несколько меньшем, чем угол сопротивления прямой последовательности. В этом случае как показано в примере, приведенном на рис. 3.92, коэффициент k_E имеет большое значение. При $k_E \approx 1$ это приводит к расширению характеристики в направлении R практически в 2 раза.

Влияние на переходное сопротивление двустороннего питания

Ток короткого замыкания, протекающий с противоположного конца через активное сопротивление в точке замыкания, вызывает дополнительное падение напряжения. Это производит тот же эффект, что и промежуточная подпитка, т.е. измеренное сопротивление замыкания увеличивается (рис. 3.93 и 3.94).

Можно вычислить сопротивление на зажимах реле со стороны A следующим образом:

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A\left(\frac{X}{l}\right)\underline{Z}_L + (\underline{I}_A + \underline{I}_B)\cdot R_П; \quad (3.90)$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A\left[\left(\frac{X}{l}\right)\underline{Z}_L + R_П\right] + \underline{I}_B\cdot R_П; \quad (3.91)$$

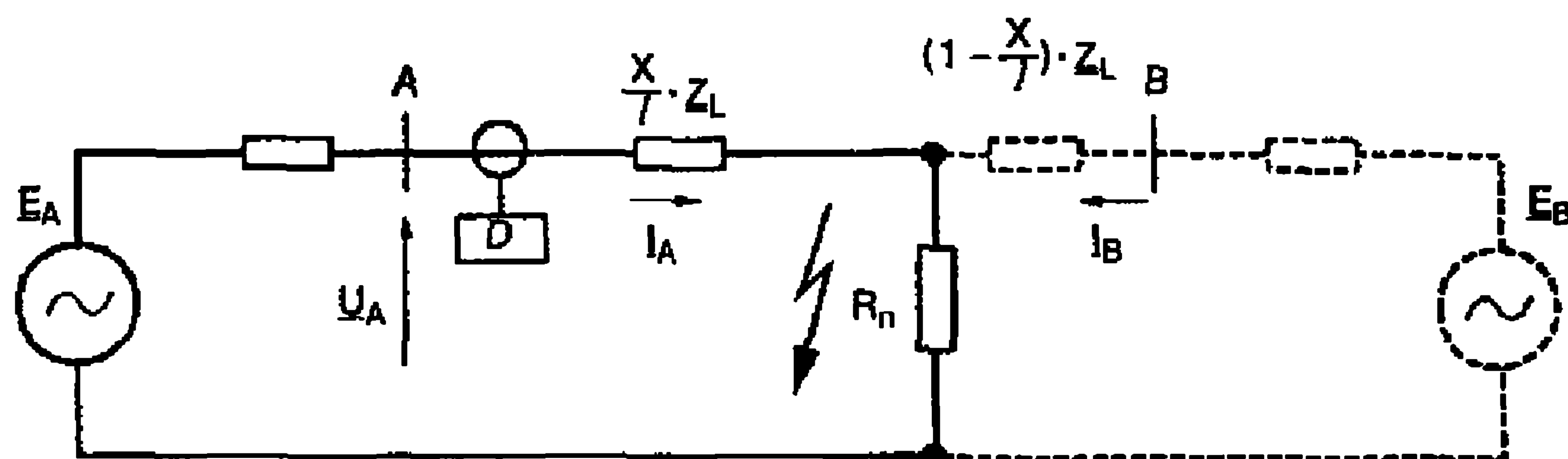


Рис. 3.93. Эквивалентная схема замещения в случае короткого замыкания на линии с двухсторонним питанием и активным сопротивлением в точке замыкания

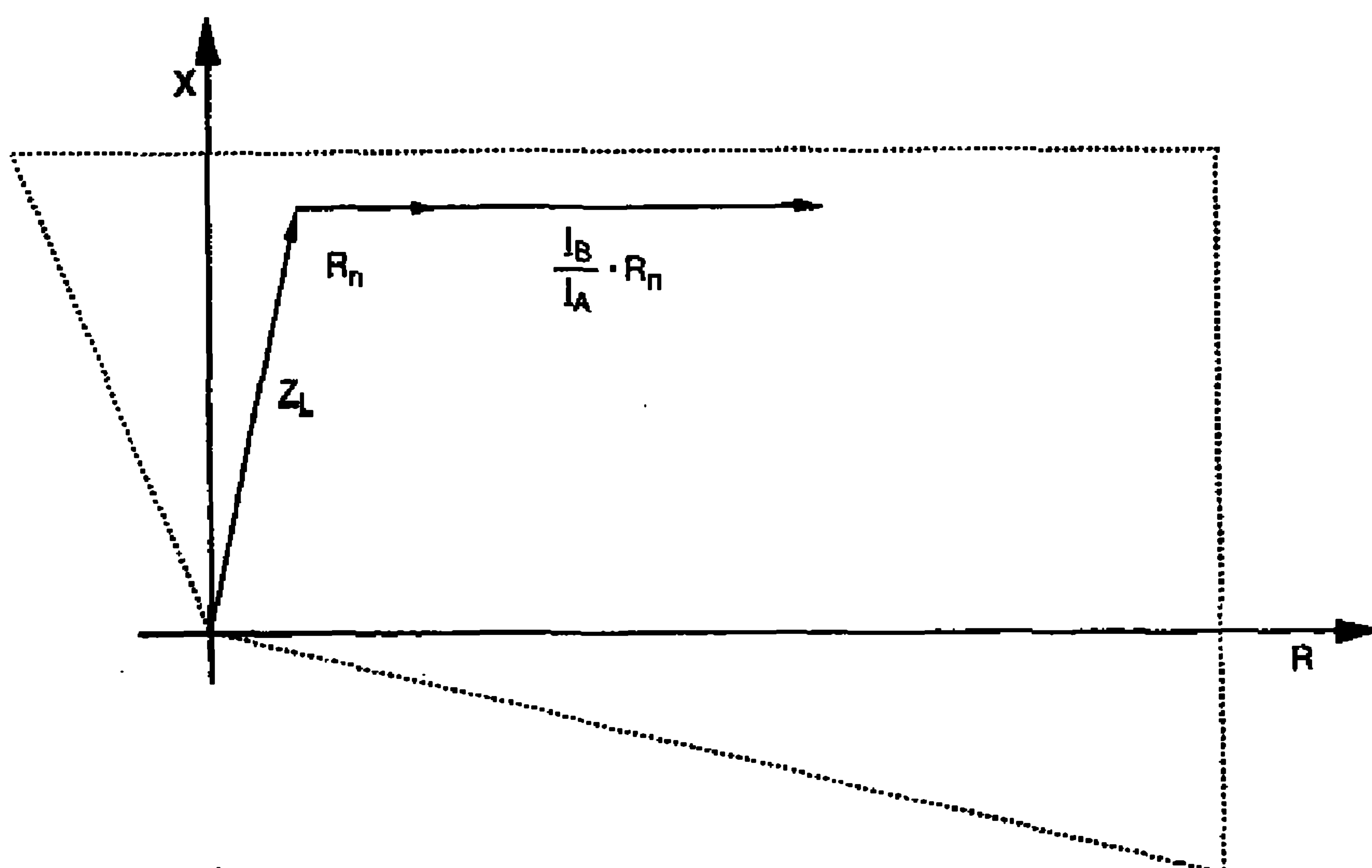


Рис. 3.94. Диаграмма сопротивлений при КЗ с сопротивлением дуги на линии с двухсторонним питанием

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} = \left(\frac{X}{l}\right)\underline{Z}_L + R_П + \frac{\underline{I}_B}{\underline{I}_A}\cdot R_П. \quad (3.92)$$

В первом приближении предполагается, что ЭДС источников $\underline{E}_A$ и $\underline{E}_B$совпадают по фазе, а сопротивление источника и линии имеют одинаковые углы (по линии не проходит ток нагрузки), а сопротивления источника и линии имеют одинаковые углы.

В этом случае токи $\underline{I}_A$ и $\underline{I}_B$ совпадают по фазе и активное сопротивление в месте КЗ увеличивается в $1 + \frac{\underline{I}_B}{\underline{I}_A}$ раз (см. рис. 3.94). Отношение токов $\underline{I}_B/\underline{I}_A$ увеличивается по



Рис. 3.95. «Видимое» сопротивление дуги в зависимости от расположения места КЗ (влияние сопротивления $R_п$ на ток короткого несущественно)

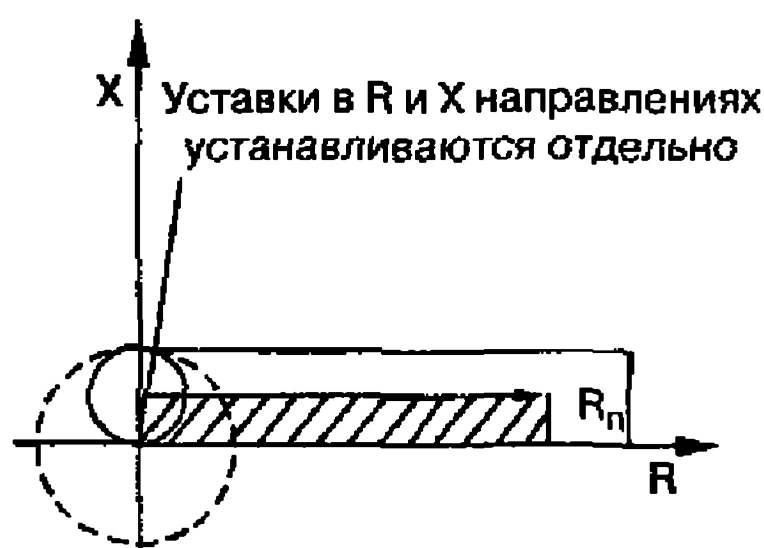


Рис. 3.96. Степень охвата переходных сопротивлений многоугольной (четырехугольной) характеристикой

мере приближения места повреждения к шинам *B*:

$$\frac{\underline{I}_B}{\underline{I}_A} = \frac{\underline{Z}_{SA} + \frac{X}{l}\underline{Z}_L}{\underline{Z}_{SB} + \left(1 - \frac{X}{l}\right)\underline{Z}_L}. \quad (3.93).$$

Это означает, что влияние удаленного источника усиливается при приближении точки замыкания к противоположному концу линии.

Это продемонстрировано на рис. 3.95.

Этот эффект очевиден на длинных линиях с мощным источником питания на противоположном конце ($\underline{Z}_{SB} \ll \underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_L$).

Поэтому, характеристика срабатывания дистанционной защиты должна иметь достаточный запас в *R*-направлении.

Характеристика в виде многоугольника (четырёхугольника) *очень хорошо подходит* для коротких воздушных линий и кабелей, где сопротивление в точке замыкания может значительно превышать полное сопротивление линии.

По сравнению с круговыми характеристиками, здесь возможна значительно лучшая *компенсация сопротивления дуги (рис. 3.96).*

На длинных линиях и для резервной защиты оптимально подходит характеристика определения замыкания (пусковая), зависимая от угла, т.к. может охватывать все возможные значения полного сопротивления замыкания (рис. 3.97).

На характеристике срабатывания РС выделяется сектор с углом около ±30°, в котором уменьшается зона действия в направлении *R* для того, чтобы предотвратить срабатывание защиты при перегрузках и качаниях. Вне этого сектора характеристика срабатывания расширяется с *увеличением R.*

В новых реле (например, 7SA522) задается зона блокирования нагрузки (по

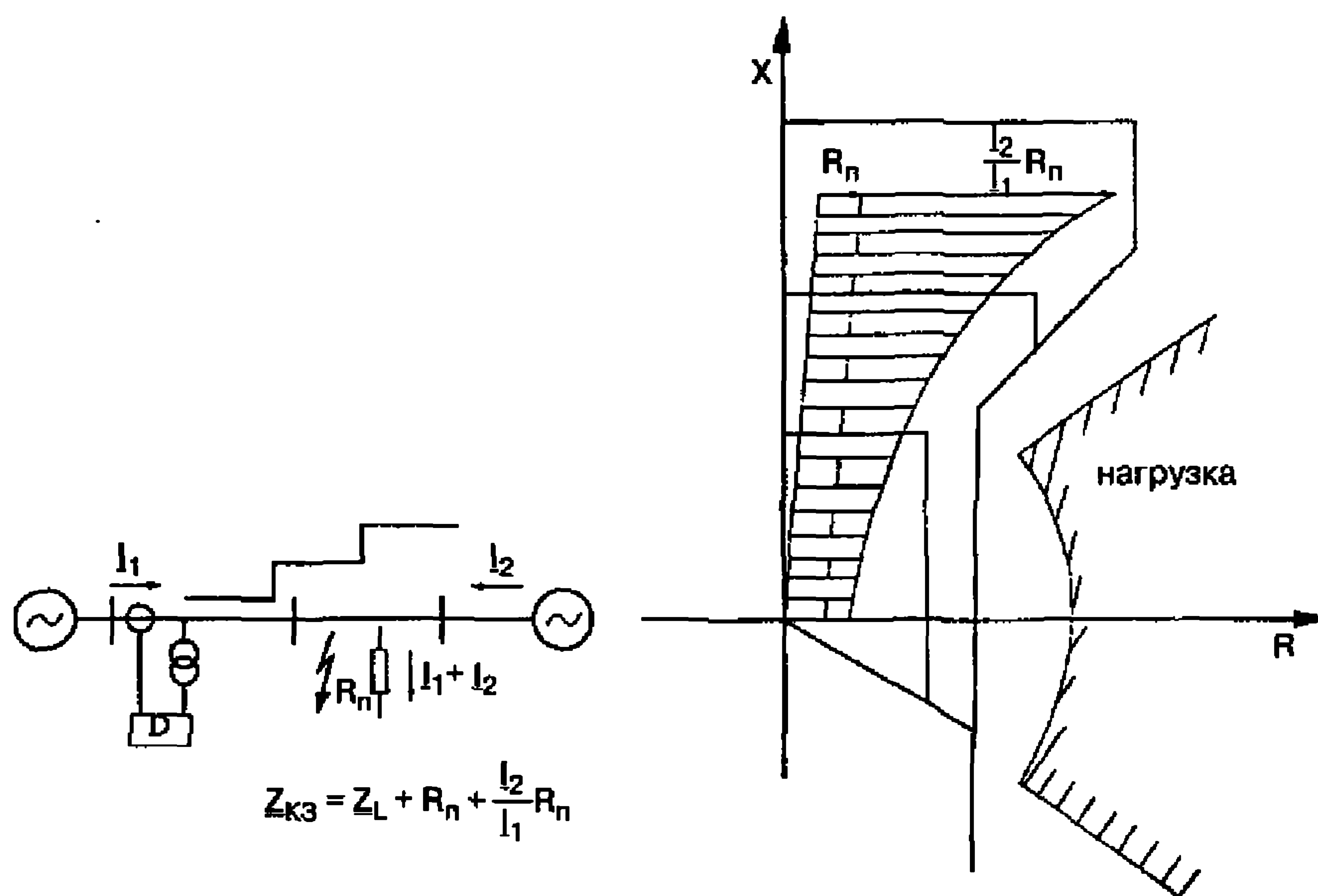


Рис. 3.97. Оптимизированная характеристика для отключения повреждений с сопротивлением дуги

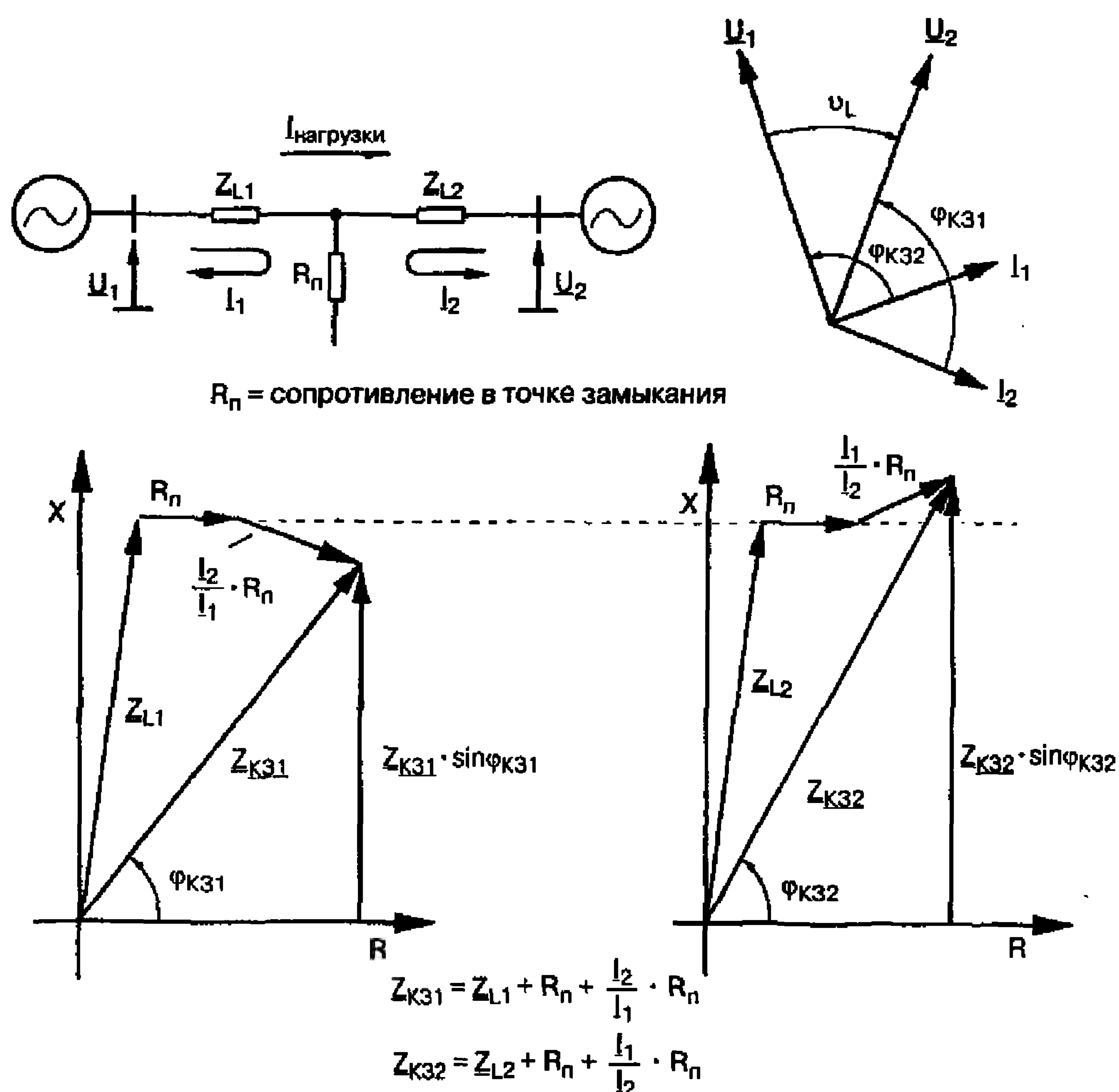


Рис. 3.98. Влияние тока нагрузки на дистанционные измерения при КЗ через переходное сопротивление

углу) как для четырехугольных, так и для круговых характеристик (см. рис. 3.20).

Влияние токов нагрузки

При передаче активной мощности по длинным линиям электропередачи необходим сдвиг фаз системных напряжений. Эквивалентная схема замещения цепи представлена на рис. 3.98. Поэтому в случае короткого замыкания питающие ЭДС имеют различные углы. Напряжение на передающем конце опережает напряжение на принимающем конце на угол ϑ_L. Поэтому, в первом приближении, токи короткого замыкания на обоих концах линии имеют такой же сдвиг по фазе. Векторы $\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} \cdot R_п$ на передающем и принимающем концах имеют разные углы наклона (по часовой стрелке и против, соответственно). Поэтому, обычное дистанционное реле на передающем конце измеряет уменьшенное сопротивление, т. е. имеет тенденцию к излишнему охвату, тогда как на принимающем конце сопротивление увеличивается, т. е. реле имеет тенденцию к неполному охвату защищаемой зоны.

В географически маленьких промышленно-развитых странах с распределённой системой выработки электроэнергии не требуется передача активной мощности на большие расстояния. Угол передачи мал, порядка 10—15°.

На рис. 3.99 представлен случай, который типичен для Германии, хотя длина линий в этой стране не превышает 100 км.

В географически больших странах мощность часто должна передаваться с

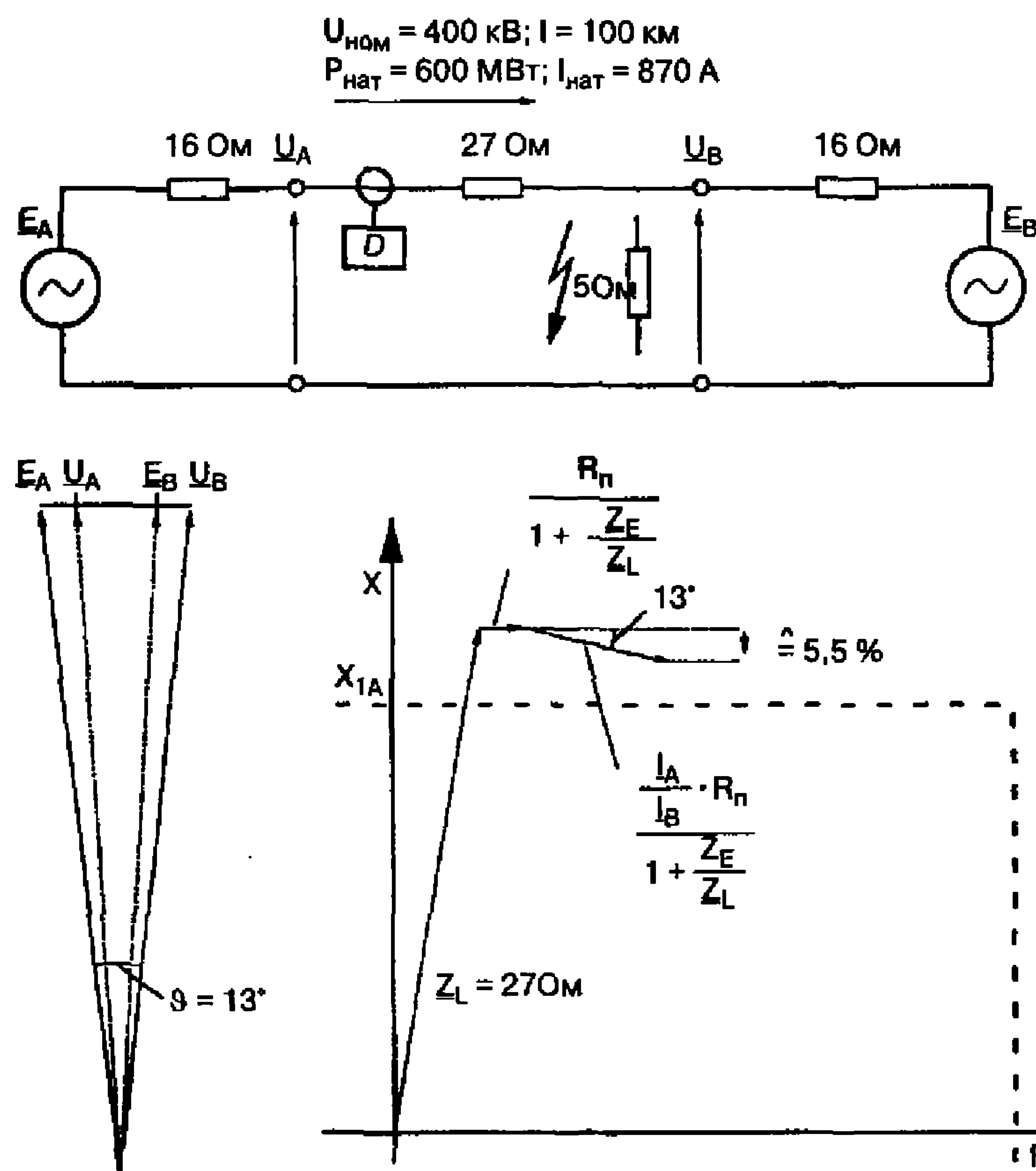


Рис. 3.99. Дистанционные измерения на коротких воздушных линиях при протекании токов нагрузки

удалённого конца, где вырабатывается электроэнергия (например, от гидростанции), на конец, где она потребляется.

В этом случае угол передачи может достигать 60°. Однако при перегрузке или при качаниях мощности угол передачи может быть ещё больше. Возможен случай, когда защита должна быть спроектирована для угла передачи равного 90°.

На рис. 3.100 представлены вычисленные сопротивления воздушных линий с напряжением 400 кВ и длиной 400 км. В этом случае угол передачи равен приблизительно 35°.

Зона действия I ступени (с неполным охватом) должна быть такой, чтобы предотвратить срабатывание при возникновении замыканий непосредственно за шинами удалённой станции. Можно видеть, что при использовании обычных характеристик реле (горизонтальная линия, без учета влияния нагрузки), может быть принята уставка, равная примерно 65 % Z_L, если необходимо отключение повреждений с переходным сопротивлением до 20 Ом.

Современные цифровые реле (7SA522, 7SA6) позволяют иметь наклон верхней стороны четырехугольной характеристики первой ступени для того, чтобы избежать расширения зоны действия в этом случае (см. п.п. 6.3.1, рис. 6.7).

В рассмотренном примере угол наклона должен быть около 25° в зоне (85—90) % уставки.

На приемном конце первая ступень с уставкой 85 % при КЗ с сопротивлением 20 Ом обеспечит охват только около 60 % линии. Это, однако, компенсируется ра-

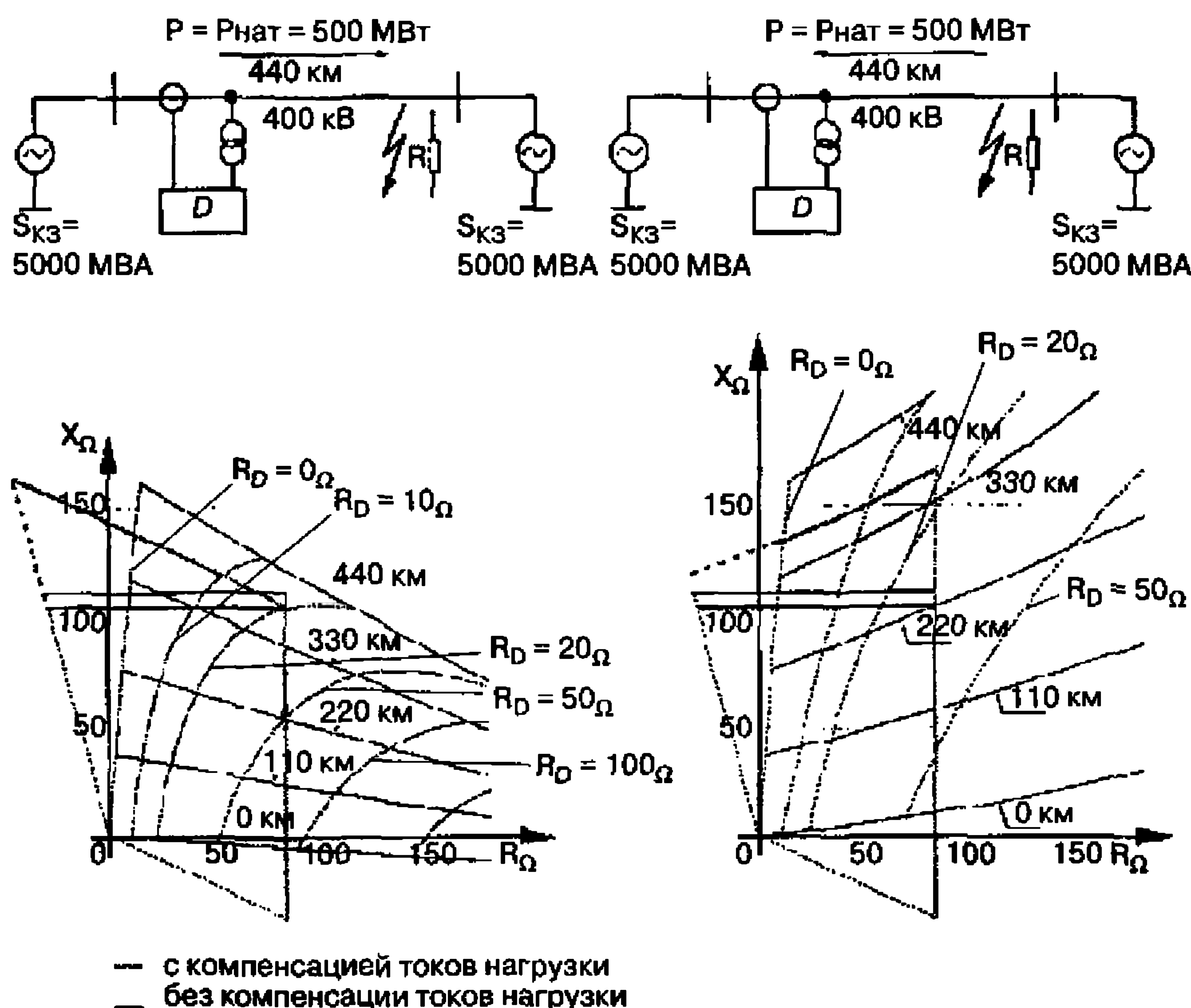


Рис. 3.100. Зависимость ошибки дистанционных измерений от сопротивления в точке замыкания при передаче мощности

ботой защиты на питающем конце: с увеличением сопротивления $R_п$ защита «видит» КЗ ближе, чем в действительности. Поэтому охват зоны первой ступенью с характеристикой без наклона и уставкой 65 % будет увеличиваться до 85 % при $R_п$ = 20 Ом.

При наличии наклона характеристики зона действия при определенной нагрузке будет оставаться неизменной (при фиксированном направлении). При уменьшении нагрузки, однако, зона действия, при этом же значении $R_п$, уменьшается (см. рис. 3.100).

В любом случае применение разрешающего сигнала для ступени с неполным охватом защищаемой зоны гарантирует надёжное определение и отключение замыкания.

При использовании цифровых дистанционных защит появляется возможность корректировки описанной выше ошибки измерений. Предпосылкой этому служит допущение об однородности системы, обеспечивающее равенство углов токов нулевой последовательности по обе стороны от места повреждения. Небольшое, но неизменное различие углов может быть компенсировано с помощью фиксированной уставки $\Delta\varphi$. Для этого в реле должна быть активизирована функция, так называемой, компенсации нагрузки или изменения угла наклона. Она действует при однофазных и двухфазных замыканиях на землю, где возможно большое активное сопротивление в точке замыкания. [3.13, 3.23]

На рис. 3.101 иллюстрируется её принцип действия на примере однофазного КЗ на землю. Эквивалентная схема замещения с использованием симметричных составляющих показывает следующее: полный ток нулевой последовательности $\underline{I}_0$, равный $\underline{I}_E/3$, проходит по сопротивлению $3 \cdot R_п$, разделяется в точке замыкания и возвращается к двум источникам питания. Действительные токи в земле в 3 раза больше: $\underline{I}_{EA} = 3 \cdot \underline{I}_{0A}$ и $\underline{I}_{EB} = 3 \cdot \underline{I}_{0B}$. Т. к. $\underline{Z}_{LA0}$

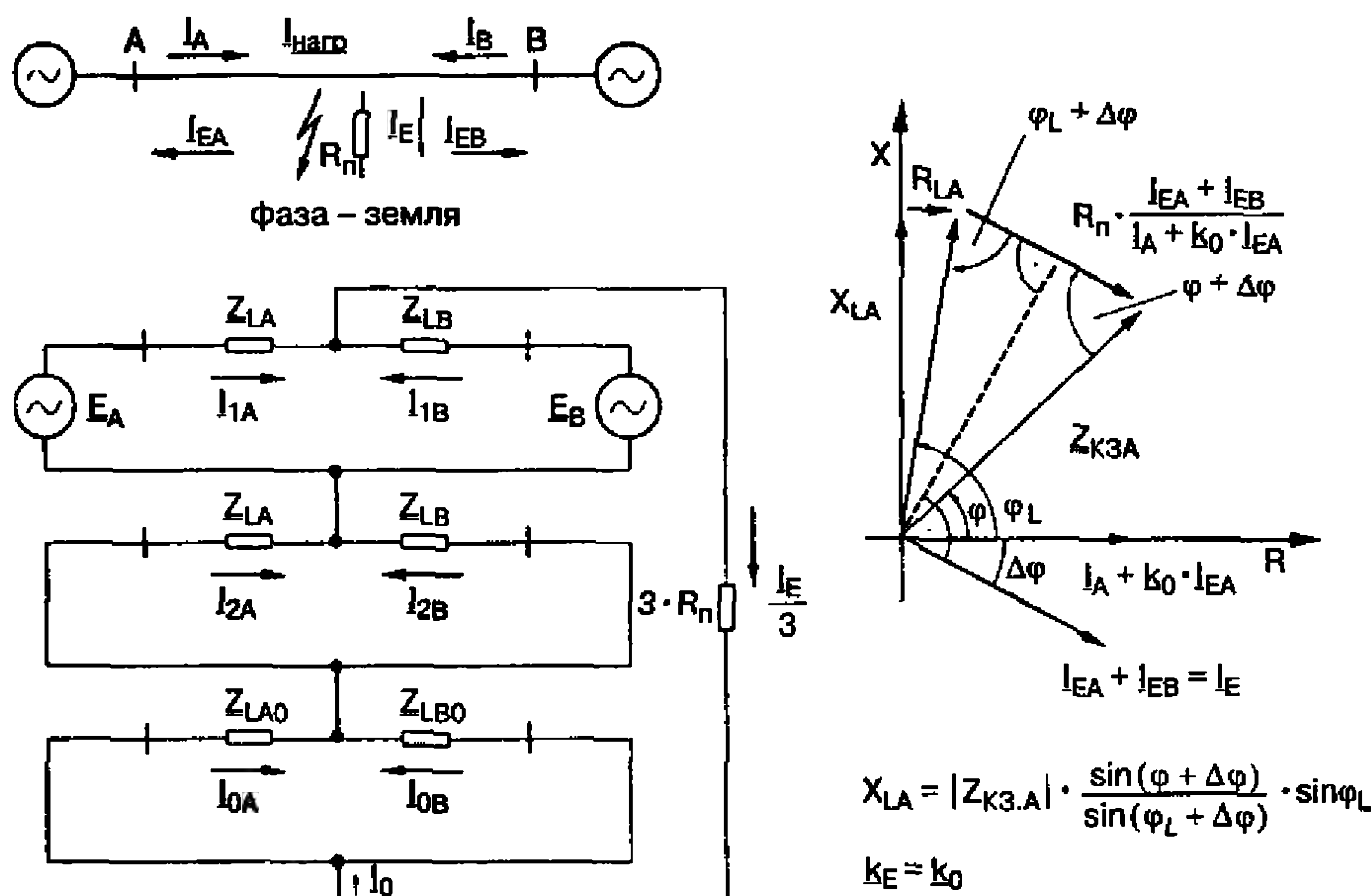


Рис. 3.101. Принцип компенсации влияния нагрузки (при замыкании фазы на землю)

и $\underline{Z}_{LB0}$ в сетях сверхвысокого напряжения имеют приблизительно один и тот же угол, т. е. одинаковое отношение X/R, токи $\underline{I}_{EA}$ и $\underline{I}_{EB}$имеют ту же фазу, что и полный ток $\underline{I}_E = \underline{I}_{EA} + \underline{I}_{EB}$, который проходит по сопротивлению в месте замыкания.

При этом сдвиг фаз Δφ может быть определён в реле на каждом конце. Поэтому, измеряемое полное сопротивление замыкания $\underline{Z}_{КЗA}$может быть скорректировано относительно истинного реактивного сопротивления $\underline{X}_{LA}$ обратным расчётом.

На диаграмме полных сопротивлений характеристика реле автоматически подстраивается под изменившуюся кривую полного сопротивления (рис. 3.100), т. е. защищаемая зона в X – остаётся постоянной и не зависит от протекающих по линии токов нагрузки, а также от переходных сопротивлений.

Следует отметить, что метод компенсации может быть реализован и с помощью токов обратной последовательности, при том же допущении свойства однородности сети.

Влияние нагрузки на поляризованные МНО—характеристики

Поворот поляризованных МНО—характеристик в связи с протеканием токов нагрузки до возникновения замыкания описан в п.п. 3.4.3.

Поворот в том же направлении, что и вектора сопротивления в месте замыкания, оказывает положительное влияние. *Погрешность измерения реактивного сопротивления* благодаря повороту вектора сопротивления в месте замыкания частично компенсируется (рис. 3.102). Наилучший эффект, однако, достигается при высокой степени поляризации напряжением неповреждённых фаз ($k_п$ близок к 1).

При уменьшении сопротивления источника питания диаметр МНО-окружности уменьшается, что приводит к уменьшению сопротивлений дуги, при которых реле может сработать. Поэтому поворот характеристики из-за влияния нагрузки,

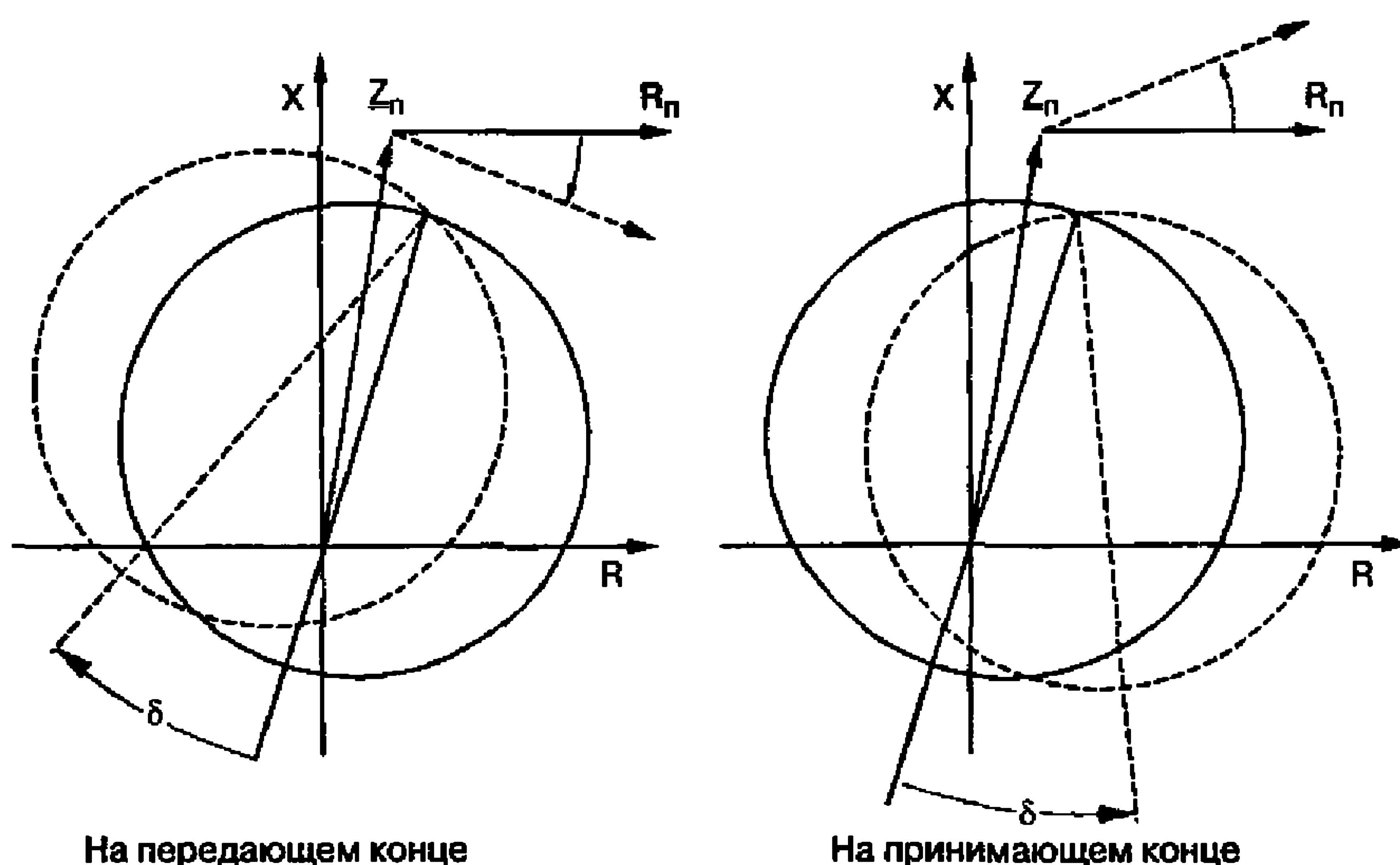


Рис. 3.102. Адаптация поляризованных МНО-характеристик к изменению фазы вектора переходного сопротивления из-за влияния тока нагрузки

вызывающий расширение ее в направлении R вряд ли приведет к расширению защищаемой зоны из-за влияния $R_п$.

Если сопротивление источника и доля используемого напряжения неповреждённых фаз велика, радиус окружности увеличивается, и граница в X-направлении становится более плоской. Вероятность излишнего охвата увеличивается, как и при использовании многоугольных характеристик. Поэтому, желателен больший поворот МНО окружностей.

Двухфазное замыкание на землю через переходное сопротивление.

В случае многофазных замыканий через переходное сопротивление возникают

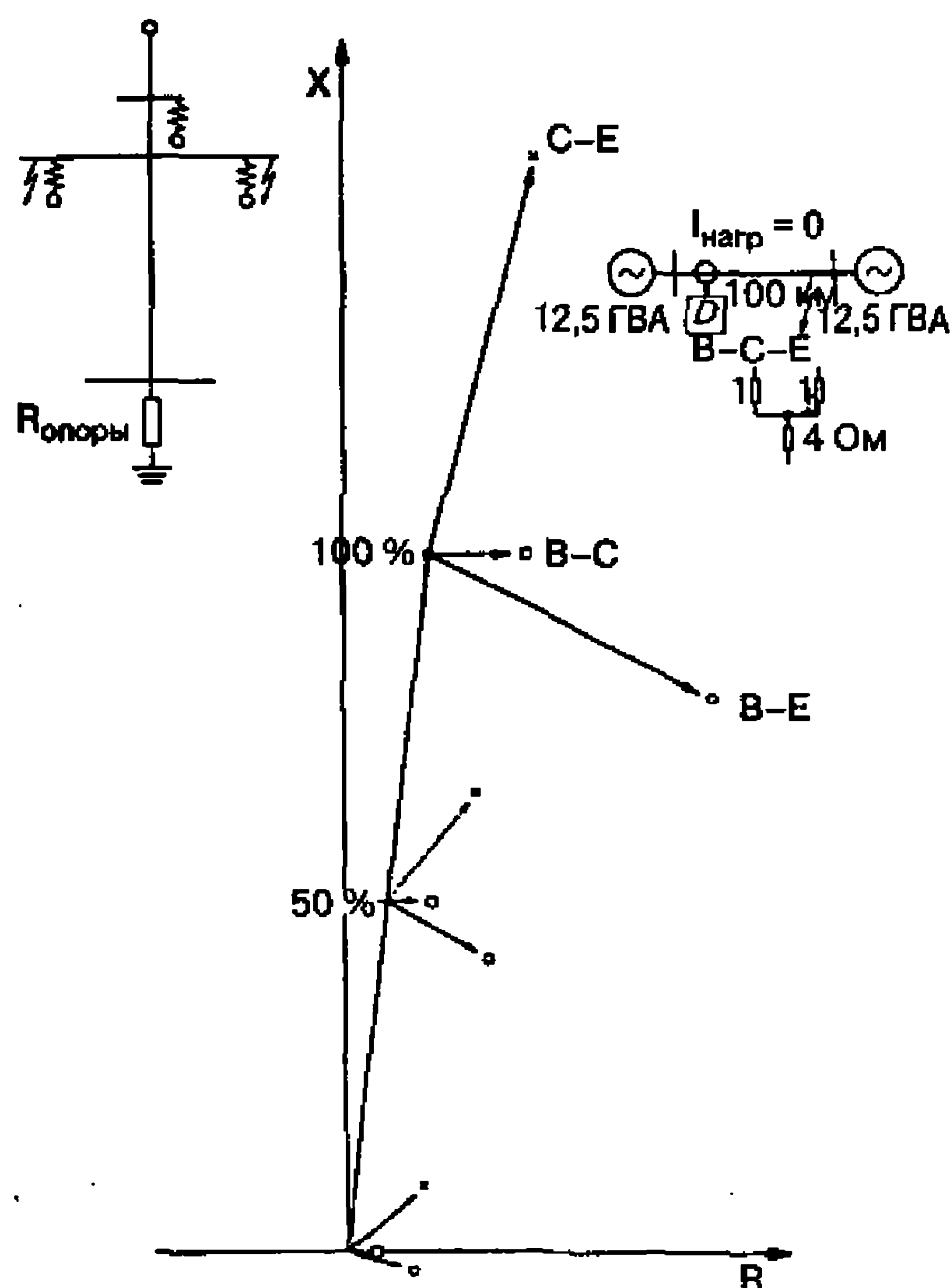


Рис. 3.103. Двухфазное КЗ на землю через *переходное сопротивление. Сопротивления* измерительных контуров в зависимости от места КЗ

сложные условия для дистанционных измерений. Повреждённые контура соединяются в точке замыкания. Следовательно падение напряжения на переходном сопротивлении усиливает их взаимосвязь.

На рис. 3.103 представлены полные сопротивления, измеренные при двухфазных *КЗ на землю. Существует 3 контура* повреждения. Например, при замыкании $K_{BC}^{(1,1)}$ (B-C-E) рассматриваются *следующие контуры:* B-E *(опережающая* фаза), C-E (отстающая фаза) и B-C (междуфазный контур). Активное сопротивление между фазами (обусловленное дугой) обычно относительно мало, тогда как общее сопротивление относительно земли может достигать больших значений (при перекрытии по дереву или опоре с высоким сопротивлением замыкания). Рис. 3.103 соответствует условиям двухфазного КЗ на землю при перекрытии по изоляторам металлической опоры. Для лучшего понимания предполагается, что питание происходит только с одной стороны.

Из векторной диаграммы измеренных сопротивлений очевидно, что при данных условиях замыкания, защита «видит» полное сопротивление контура B-E (опережающая фаза) слишком маленьким, тогда как полное сопротивление контура отстающей фазы C-E слишком большим.

Сопротивление контура B-C измеряется почти правильно — (небольшая погрешность определения X). Влияние переходного сопротивления еще усиливается из-за протекания токов нагрузки, что описано выше.

Результаты вычислений для заданного значения *передаваемой мощности при* различных значениях переходного сопротивления замыкания на землю представлены на *рис. 3.104.*

Для выбора контуров при двухфазных КЗ на землю в заземленных системах мо-

гут быть использованы следующие рекомендации:

Одноцепная воздушная линия.

Односистемная дистанционная защита:

— выбор соответствующего междуфазного контура.

Полная схема дистанционной защиты (защита без переключения входных величин):

— измерения для всех шести контуров,

— блокировка измерений в опережающем контуре фаза—земля при двухфаз-

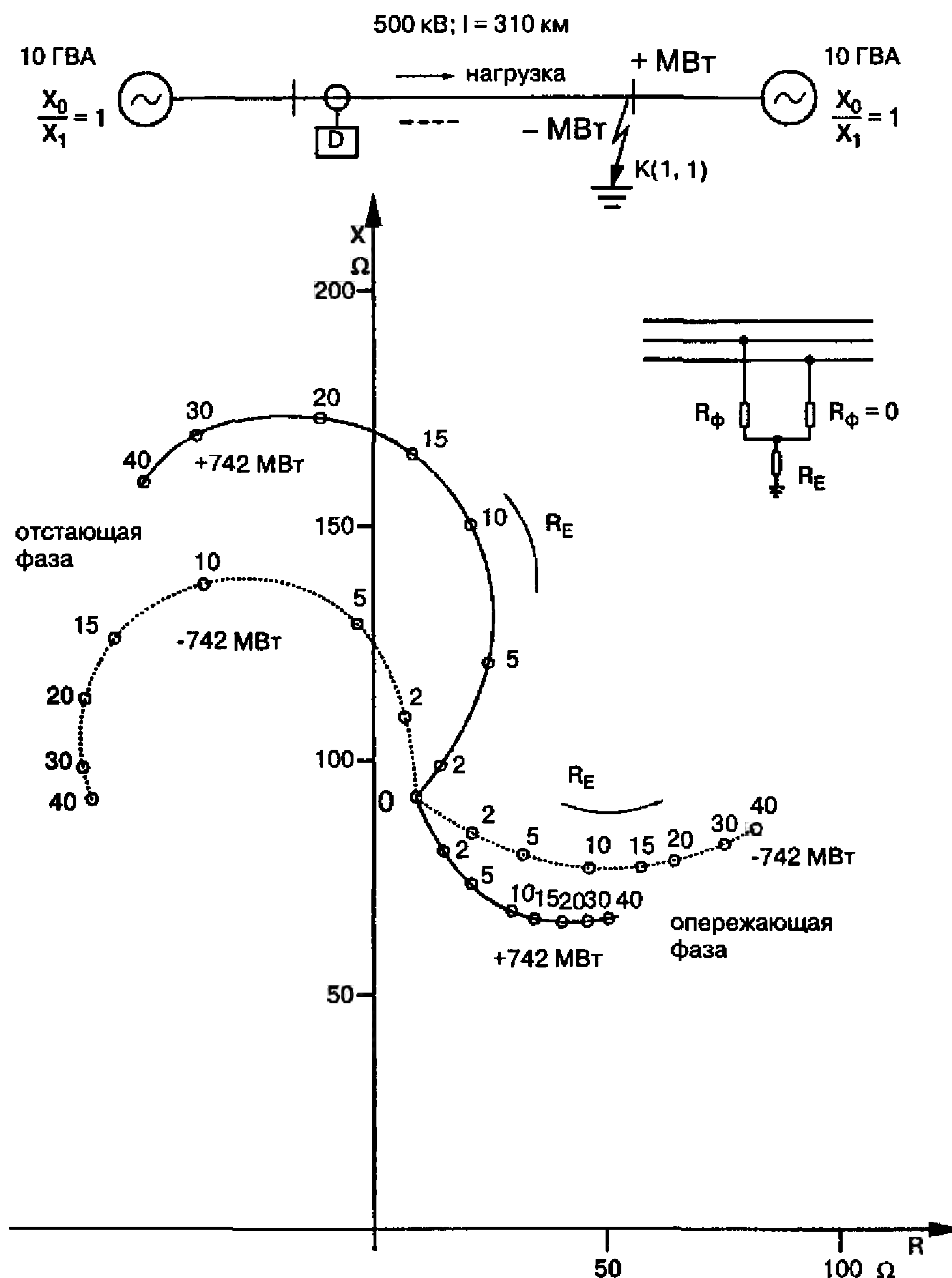


Рис. 3.104. Зависимость сопротивлений, измеренных при двухфазных КЗ на землю, от переходного сопротивления R_E и условий передачи мощности нагрузки

ных КЗ на землю для предотвращения излишнего охвата защищаемой зоны.

Двухцепная воздушная линия

Из-за возможности двух замыканий на землю в различных точках соседних систем необходимо проведение измерений в контурах фаза—земля. Таким образом возможно проведение отдельных измерений для двух однофазных КЗ на землю в каждой системе.

Односистемная дистанционная защита.

Выбор контура фаза—земля для опережающей фазы:

Если ожидается большое переходное сопротивление при замыкании на землю (*плохое заземление опоры*), уставка может быть уменьшена соответственно.

В случае параллельной работы линий из-за влияния взаимоиндукции, возможно сокращение защищаемой зоны. А, следовательно, излишний охват маловероятен (см. п.п. 3.5.3).

Вероятность излишнего охвата снижается ещё больше из-за влияния промежуточной подпитки (см. п.п. 3.5.2).

Производить выбор отстающей фазы не рекомендуется, т. к. зона досягаемости может быть слишком маленькой.

Полная схема дистанционной защиты (защита без переключения входных величин).

Измерения осуществляются всеми измерительными системами и уменьшаются значения уставки ступени с неполным охватом для контуров фаза—земля, если возможны большие значения активных переходных сопротивлений.

Короткое замыкание с дугой

Ток и напряжение на дуге синфазны (рис. 3.105). Поэтому сопротивление дуги в схеме замещения представляется активным сопротивлением. Таким образом, напряжение трапецеидальной формы складывается с синусоидальным падением напряжения на сопротивлении воздушной линии.

Искажение формы напряжения более вероятно при возникновении близких к месту установки защиты КЗ с дугой. Большое влияние на точность измерений это оказывает только на очень коротких линиях, где переходное сопротивление дуги оказывается существенным при замыканиях вблизи границы зоны срабатывания.

В цифровых реле этим влиянием можно пренебречь благодаря применению цифровых фильтров.

Активное сопротивление дуги

Много лет назад была проведена оценка значения активного сопротивления дуги по результатам испытаний, которые проводились при различных длинах линий [3.28, 3.29].

В первом приближении можно предположить, что напряжение на дуге не зависит от значения тока и равно приблизительно 2000—2500 В/м дуги [3.28].

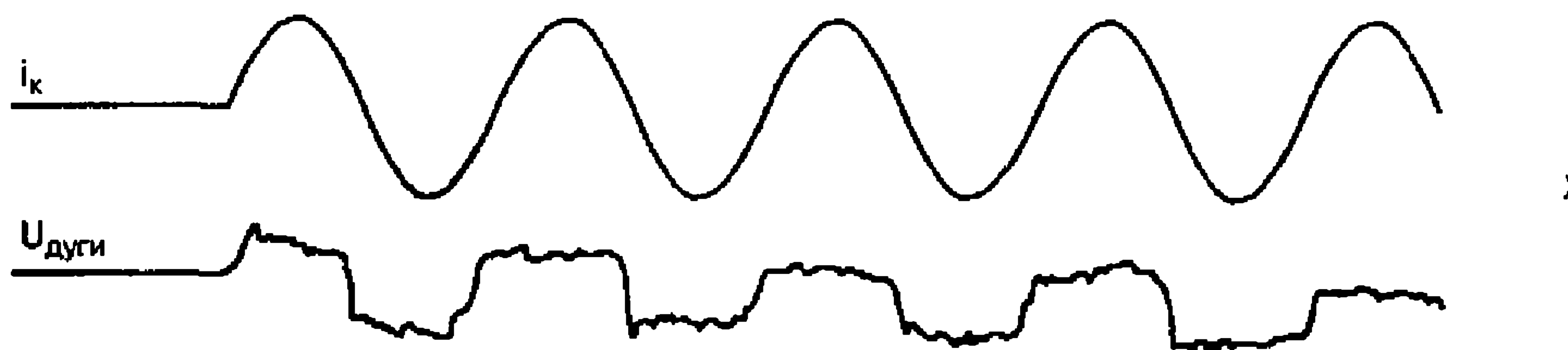


Рис. 3.105. Осциллограмма тока короткого замыкания и напряжения дуги

Это можно использовать в качестве стандартного значения:

$U_{дуги}$= 2500 В/м.

Тогда сопротивление дуги:

$$R_{дуги} = \frac{2500 \cdot l_{дуги}}{I_{дуги}} \text{ [Ом]}, \quad (3.94)$$

$l_{дуги}$= длина дуги в м;
$I_{дуги}$ = ток дуги в А.

При учёте зависимости напряжения дуги от тока дуги используют следующую зависимость (уравнение «Warrington») [3.28]:

$$R_{дуги} = \frac{28700 \cdot l_{дуги}}{I_{дуги}^{1,4}} \text{ [Ом]}, \quad (3.95)$$

$l_{дуги}$ = длина дуги в м;
$I_{дуги}$ = ток дуги в А.

Из-за действия ветра и динамики дуга расширяется. При учёте этого [3.29]:

$$R^*_{дуги} = \left(1 + \frac{5 \cdot v \cdot t_B}{l_{дуги}}\right) \cdot R_{дуги}, \quad (3.96)$$

$l_{дуги}$= исходная длина дуги в метрах;
v = скорость ветра, м/с;
t_B = время существования дуги, с.

Числовой пример:

Воздушная линия 400 кВ, перекрытие изоляторов (3 длинностержневых изолятора, длина изолятора 127,5 см, минимальный ток КЗ: 4 кА)

Найти сопротивление дуги в момент возникновения замыкания и через 1с.

Решение

Длина дуги определяется по длине изоляторов с запасом в 50 %:

$l_{дуги}$ = 1,5 · (3 · 127,5) = 573,75 см ≈ 6 м.

Сопротивление дуги в момент возникновения замыкания (для проверки 1-ой ступени дистанционной защиты):

По (3.94): $R_{дуги} = \frac{2500 \cdot 6,0}{4000} = 3,75$ Ом.

По (3.95): $R_{дуги} = \frac{28700 \cdot 6,0}{4000^{1,4}} = 1,56$ Ом;

Сопротивление дуги через 1 с (проверка 3-ей ступени):

По (3.96): $R^*_{дуги}$ (1 с) = $\left(1 + \frac{5 \cdot 3 \cdot 1}{6}\right) \times$ × 3,75 = 3,5 · 3,75 = 13,1 Ом или 5,46 Ом, соответственно.

Влияние сопротивления дуги на линиях с двусторонним питанием

Напряжение дуги, в первом приближении, или постоянно, или оно уменьшается в соответствии с уравнением «Warrington», с коэффициентом $I^{0,4}_{дуги}$.

Поэтому, и сопротивление дуги не остается постоянным, а уменьшается с коэффициентом $1/I_{дуги}$ или $1/I^{1,4}_{дуги}$.

При двустороннем питании места повреждения поведение дуги будет другим.

Эквивалентная схема замещения линии с двусторонним питанием, представленная на рис. 3.93, так же может быть использована и здесь. Постоянное переходное сопротивление в точке замыкания должно быть заменено постоянным напряжением ($\underline{U}_{дуги}$) (рис. 3.106).

Первоначально зависимостью напряжения от тока можно пренебречь.

Тогда напряжение в месте установки реле:

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_L + \underline{U}_{дуги}. \quad (3.97)$$

И полное сопротивление, измеряемое реле:

---

*В [Д.1] принято $R_{дуги} = \frac{1050 l_{дуги}}{I_{дуги}}$.

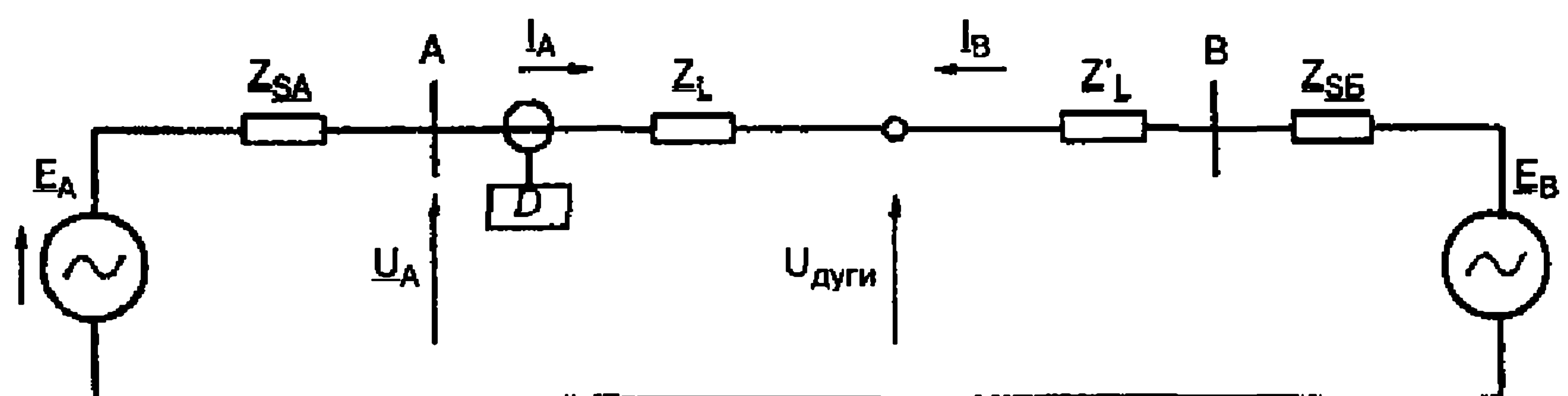


Рис. 3.106. Эквивалентная схема замещения для замыкания с сопротивлением дуги и при двустороннем питании

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_A} = \underline{Z}_L + \frac{\underline{U}_{дуги}}{\underline{I}_A}. \tag{3.98}$$

Из этого выражения хорошо видно, что сопротивление дуги, которое «видит» реле, не зависит от значения тока на противоположном конце (рис. 3.107). Из этого вытекает следующее правило определения уставок:

Правило.

Увеличение активного сопротивления в месте замыкания из-за дополнительного тока с противоположного конца: $R_п^* = (1 + \underline{I}_A/\underline{I}_B) \cdot R_п$ происходит только при постоянном значении сопротивления.

При расчёте эффективного сопротивления дуги в месте установки реле по выражению (3.94) с постоянным значением

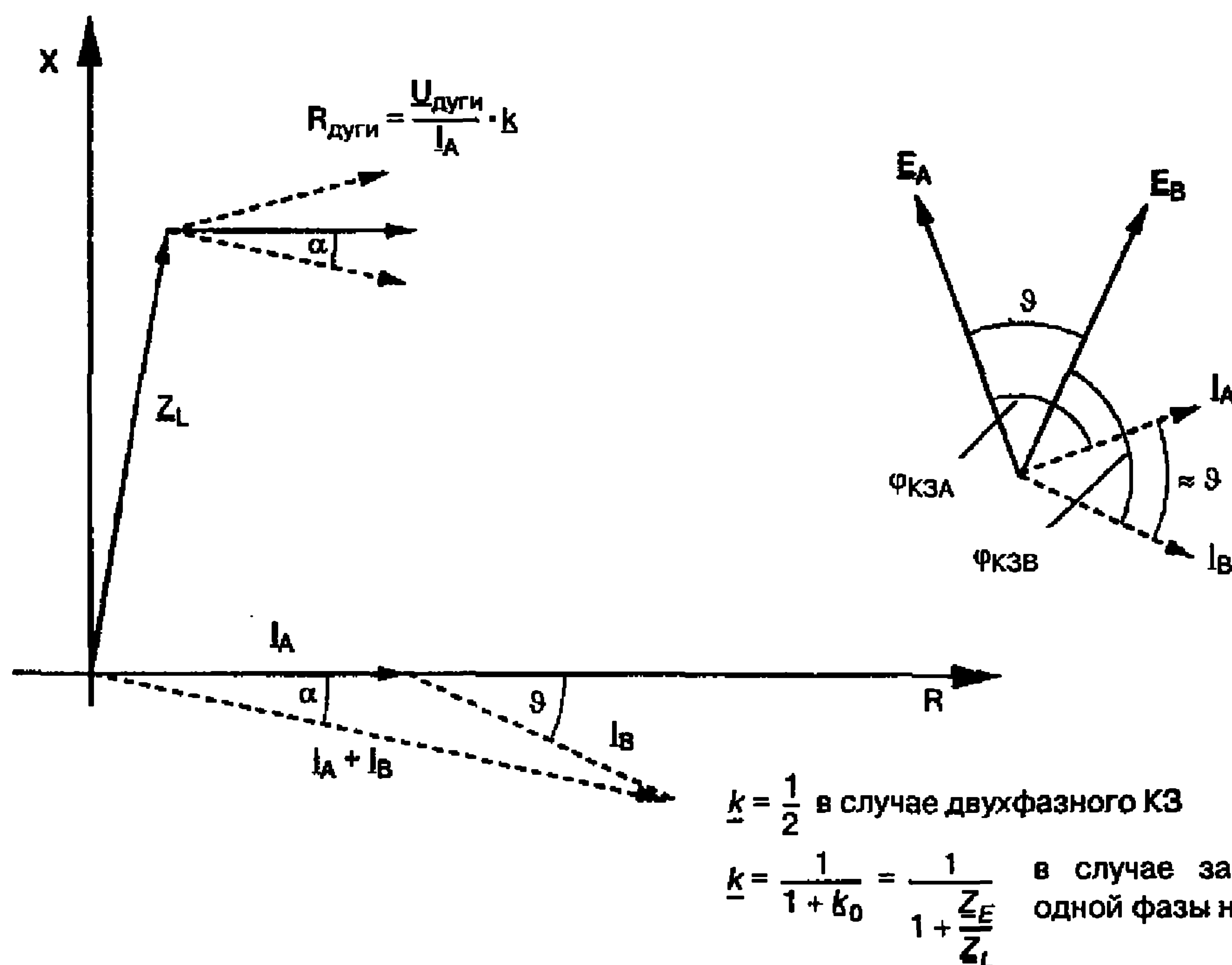


Рис. 3.107. Влияние сопротивления дуги на дистанционные измерения при двустороннем питании

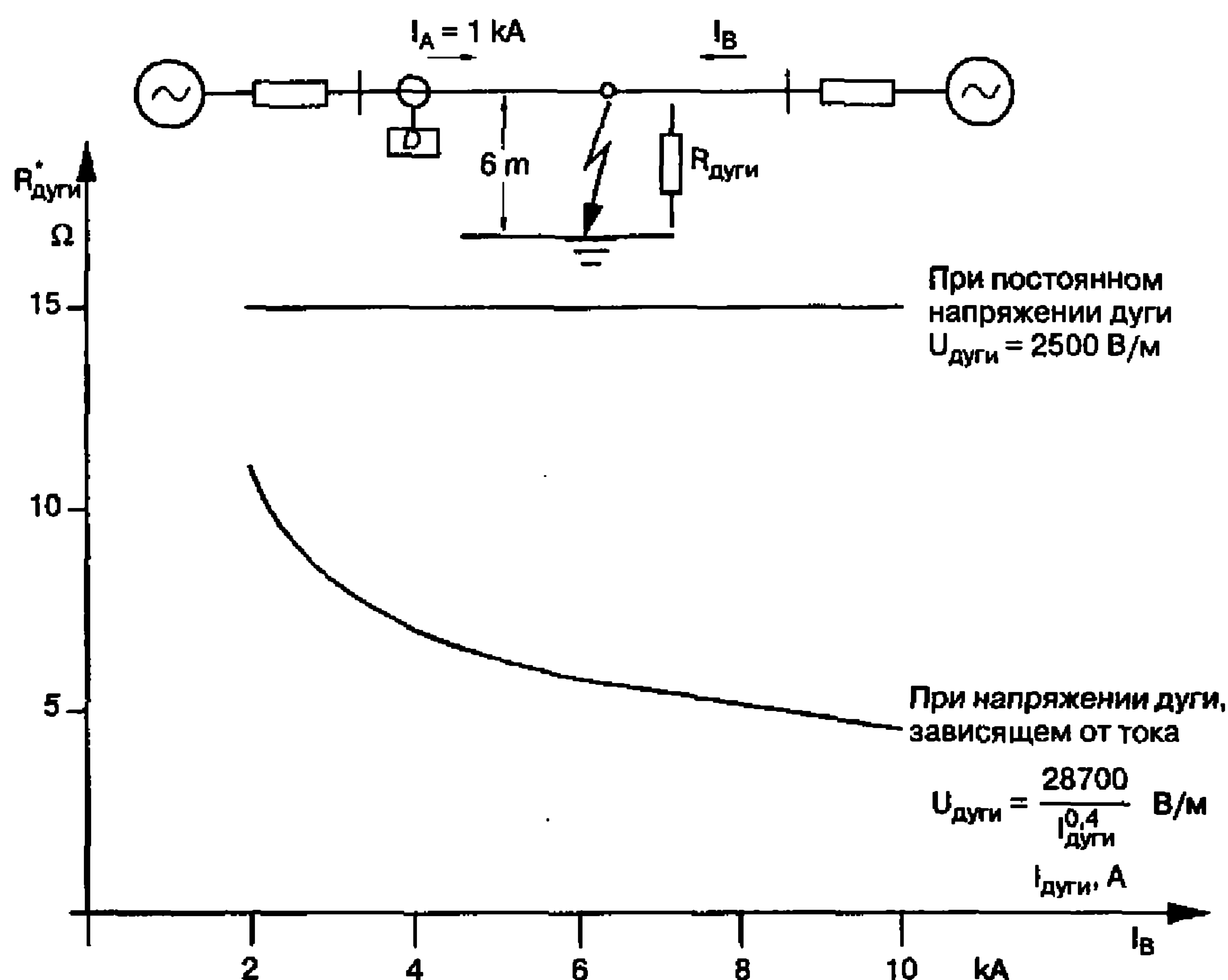


Рис. 3.108. Эффективное сопротивление дуги, «видимое» реле на линии с двусторонним питанием (пример)

напряжения дуги, ток с противоположного конца может не учитываться.

При расчёте по выражению (3.95) эффективное сопротивление даже уменьшается, т. к. уменьшение сопротивления больше, чем увеличение тока (рис. 3.108).

Сопротивление заземления опоры

Большинство замыканий на высоковольтных воздушных линиях электропередач происходит вследствие перекрытия гирлянд изоляторов. В этом случае ток короткого замыкания течёт от фазного проводника по дуге, затем по металлической арматуре опоры, а оттуда стекает на землю. Это означает, что в месте замыкания активное сопротивление дуги и сопротивление заземления опоры соединены последовательно.

На линиях с заземленными тросами (грозозащитные тросы) ток растекается по нескольким параллельным сопротивлениям заземления опор, вследствие чего результирующее сопротивление контура «фаза—земля» значительно снижается (рис. 3.109) [3.30, 3.31].

Сопротивления заземления опор и заземляющего проводника на воздушной лини могут быть представлены большим числом Т-образных звеньев, соединённых последовательно («многозвенная сеть»). При замыканиях, которые находятся не слишком близко к подстанции, действие сопротивлений заземления опор аналогично действию двух параллельных «многозвенных сетей» (в конце линии оно представляется одной «многозвенной сетью», параллельной сопротивлению заземления станции).

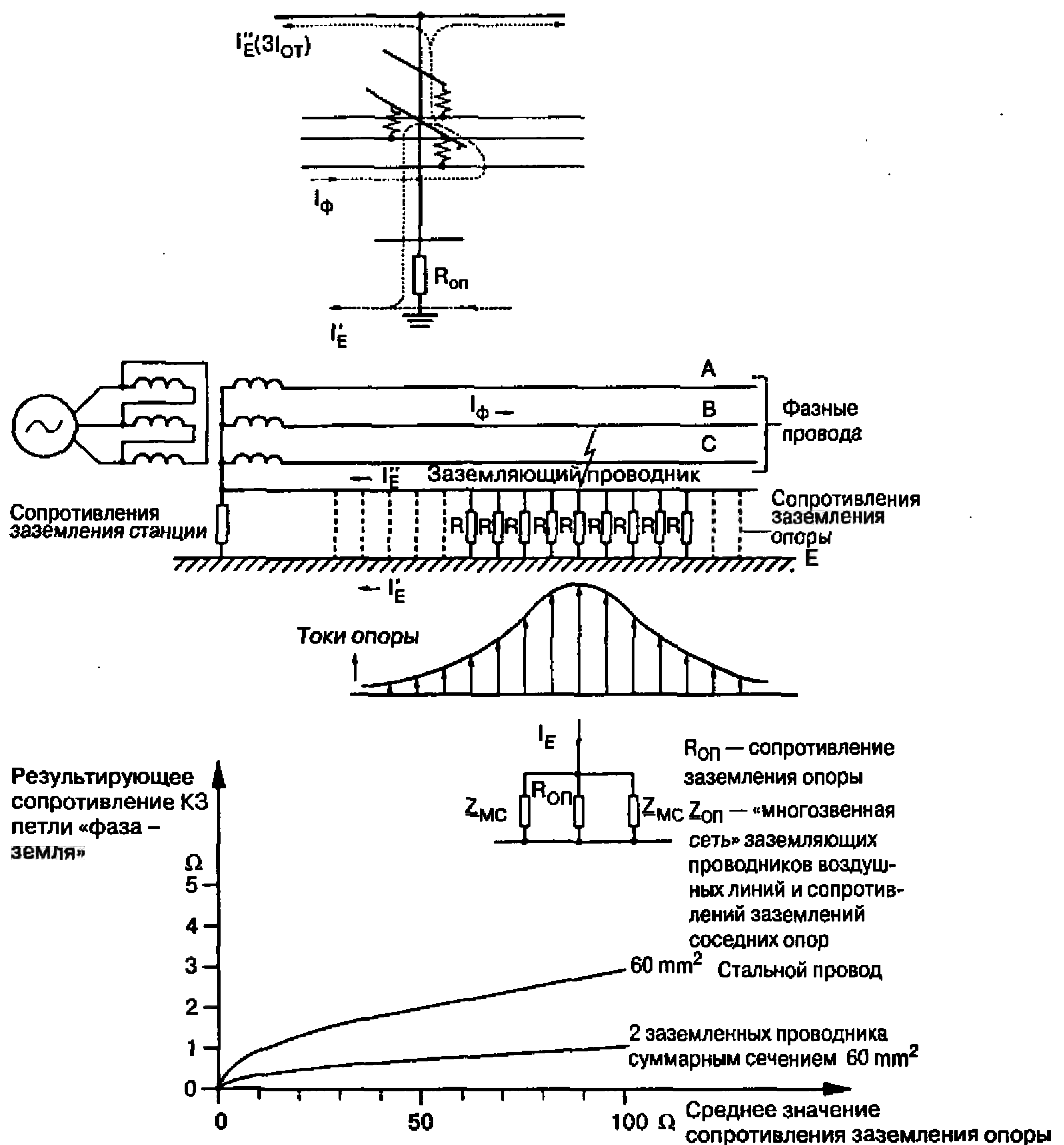


Рис. 3.109. Результирующее сопротивление при замыкании на воздушной линии с заземляющими проводниками

В соответствии со сказанным полное сопротивление заземления опоры определяется соотношением:

$$\underline{Z}_{E\text{-оп}} = \frac{R_{\text{оп}} \cdot \frac{1}{2}\underline{Z}_{\text{МС}}}{R_{\text{оп}} + \frac{1}{2}\underline{Z}_{\text{МС}}}, \qquad (3.99)$$

$$\underline{Z}_{\text{МС}} = \frac{1}{2} \cdot \underline{Z}'_{\text{ТР}} \cdot l_{\text{п}} + \sqrt{\frac{(\underline{Z}'_{\text{ТР}} \cdot l_{\text{п}})^2}{4} + R_{\text{оп}} \cdot \underline{Z}'_{\text{ТР}} \cdot l_{\text{п}}}, \qquad (3.100)$$

где $\underline{Z}'_{\text{ТР}} = \underline{R}'_{\text{ТР}} + jX'_{\text{ТР}}$.

В выражениях (3.99) и (3.100) приняты следующие обозначения:

$\underline{Z}_{E\text{-оп}}$ — эффективное полное сопротивление заземления опоры

$R_{\text{оп}}$ — среднее значение активного сопротивления опоры

$\underline{Z}_{\text{МС}}$ — полное сопротивление одной «многозвенной сети» (заземляющие проводники (тросы) воздушных линий и последовательно-параллельно соединённые сопротивления заземления опор)

$R'_{\text{ТР}}$ — удельное активное значение сопротивления заземляющего проводника (троса), Ом/км

$X'_{\text{ТР}}$ — удельное значение реактивного сопротивления заземляющего проводника (троса), Ом/км

$l_{\text{п}}$ — средняя длина пролёта между опорами, км

Учитывая то, что полное сопротивление параллельно соединённых «многозвенных сетей» мало по сравнению с активным сопротивлением заземления, результирующее полное сопротивление замыкания на землю может быть приблизительно подсчитано по следующему выражению:

$$\underline{Z}_{E\text{-оп}} = \frac{1}{2}\sqrt{R_{\text{оп}} \cdot \underline{Z}'_{\text{ТР}} \cdot l_{\text{п}}} =$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{R_{\text{оп}} \cdot \left|\underline{Z}'_{\text{ТР}}\right| \cdot l_{\text{п}}} \cdot e^{j\frac{\varphi_{\text{ТР}}}{2}}. \qquad (3.101)$$

Числовой пример:

Дано:

Заземляющий проводник 120/42 Al/St; $l_n = 230$ м;

$R'_{\text{ТР}} = 0{,}234$ Ом/км; $X'_{\text{ТР}} = 0.748$ Ом/км;

$R_{\text{оп}} = 10$ Ом.

$|\underline{Z}'_{\text{ТР}}| = \sqrt{0{,}748^2 + 0{,}234^2} = 0{,}784;$

и $\varphi_{\text{ТР}} = \text{arctg}\,(X'_{\text{ТР}}/R'_{\text{ТР}}) = \text{arctg}\,(0{,}748/0{,}234) = 72{,}6^\circ$;

$$\underline{Z}_{E\text{-оп}} = \sqrt{10 \cdot 0{,}784 \cdot e^{j72{,}6^\circ} 0{,}230} =$$

$$= 0{,}67 \cdot e^{j36{,}3^\circ} = 0{,}54 + j0{,}40 \text{ Ом}.$$

Из этого примера хорошо видно, что сопротивления заземления опор пренебрежимо малы при наличии заземляющего проводника с высокой проводимостью, и если заземления опор не обладают чрезвычайно высокими сопротивлениями. Более того, видно, что полное эффективное сопротивление заземления содержит индуктивную составляющую, т. е. дистанционная защита «видит» расстояние до замыкания несколько большим, чем на самом деле. Значение 0,4 Ом соответствует приблизительно 1,5—2 км длины высоковольтной линии электропередачи. При наличии источника питания на противоположном конце, эта реактивная составляющая увеличится, как и активная (см. рис. 3.93 и 3.94). Получаем неполный охват зоны защиты.

3.5.2. Промежуточная подпитка

Влияние промежуточной подпитки уже было рассмотрено в п.п. 3.1.14.

Влияние промежуточной подпитки на дистанционную защиту ещё раз представлено на рис. 3.110. Обычно она вызывает увеличение измеряемого сопротивления.

Промежуточная подпитка на нижерасположенных станциях влияет на поведение ступеней с полным охватом, резервных ступеней, а также пусковой ступени, выявляющей повреждения.

Проблемы, касающиеся удалённых резервных защит, рассмотрены в п.п. 3.1.14.

На Т-образных линиях измеряемое полное сопротивление может уменьшиться

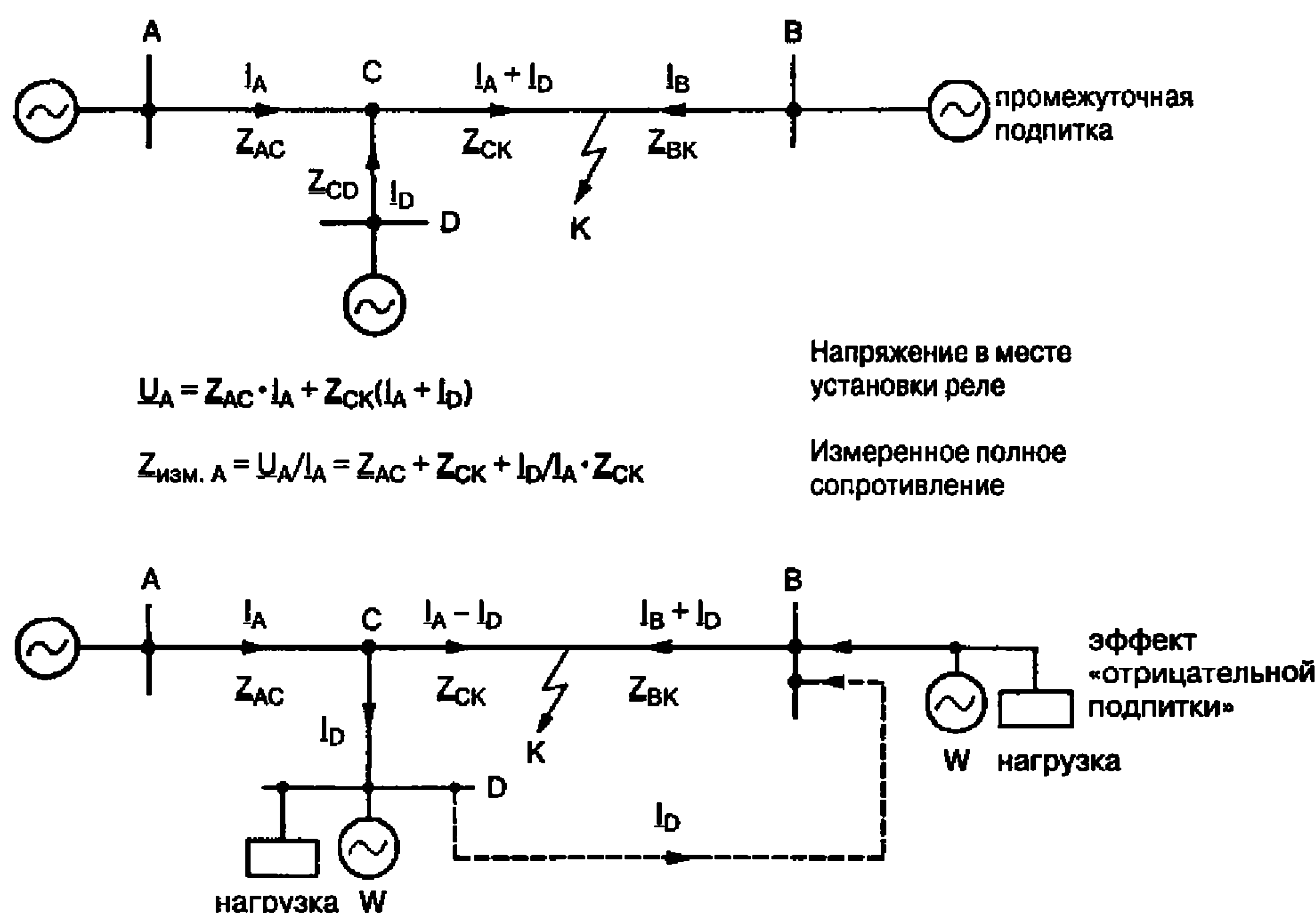


Рис. 3.110. Линия с промежуточной подпиткой

из-за эффекта «отрицательной подпитки», когда при возникновении внутренних КЗ. Ток «вытекает» во внешнюю цепь. Это показано на нижнем рисунке: при КЗ на линии ВС ток I_D направлен от шин С к шинам D. Принципиально, уменьшение полного сопротивления замыкания происходит из-за параллельных цепей в контуре замыкания. Если источник в точке D маломощный (рис. 3.110) или отсутствует, то эффект снижения сопротивления только усиливается.

<u>Влияние заземлённых трансформаторов</u>

Заземлённые трансформаторы являются источниками токов нулевой последовательности. Это также влияет на дистанционные измерения.

Ток заземленной нейтрали трансформатора вызывает дополнительное падение напряжения нулевой последовательности в контуре короткого замыкания. Это вызывает увеличение измеряемого значения полного сопротивления (рис. 3.111).

Напряжение контура «фаза—земля» в месте установки защиты определяется соотношением:

$$\underline{U}_{АФ-E} = x\,[\underline{I}_{Ф-L} \cdot \underline{Z}'_{1-L} + \underline{I}_{E-L} \cdot \underline{Z}'_{E-L}] + y\,[\underline{I}_{Ф-T} \cdot \underline{Z}''_{1-L} + \underline{I}_{E-T} \cdot \underline{Z}''_{E-L}] \qquad (3.103)$$

или

$$\underline{U}_{АФ-E} = x \cdot \underline{Z}'_{1-L} \cdot \left[\underline{I}_{Ф-L} + \underline{I}_{E-L} \cdot \frac{\underline{Z}'_{E-L}}{\underline{Z}'_{1-L}}\right] + y\,[\underline{I}_{Ф-T} \cdot \underline{Z}''_{1-L} + \underline{I}_{E-T} \cdot \underline{Z}''_{E-L}], \qquad (3.104)$$

где $\underline{I}_{Ф-L}$, $\underline{I}_{Ф-T}$ — токи фаз в линии и трансформаторе,

$\underline{I}_{E-L}$, $\underline{I}_{E-T}$ — токи нулевой последовательности ($I_E = 3I_0$) в линии и трансформаторе.

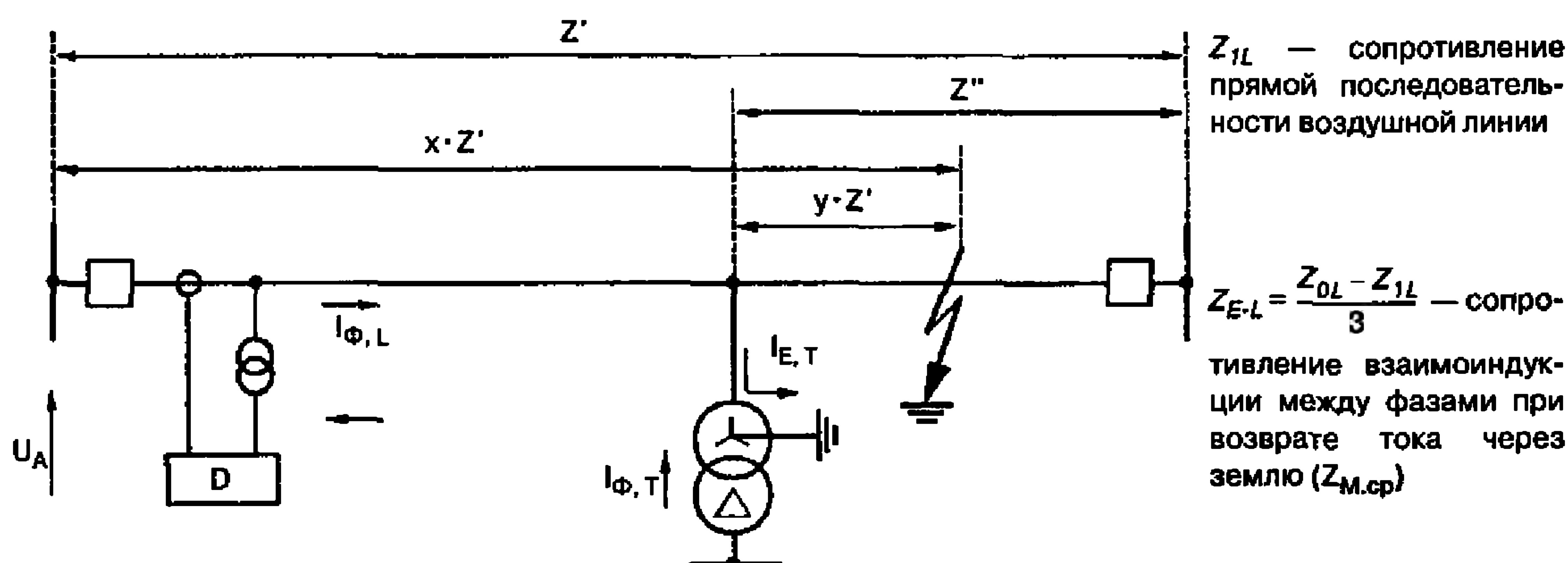


Рис. 3.111. Влияние заземленных нейтралей на дистанционные измерения

Измерение полного сопротивления фаза — земля выполняется по следующему выражению:

$$\underline{Z}_R = \frac{\underline{U}_{AФ-E}}{\underline{I}_{Ф\text{-}L} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{E\text{-}L}}. \quad (3.105)$$

При использовании уставки $\underline{k}_0$, соответствующей линии, т. е. $\underline{k}_0 = \underline{Z}'_{EL}/\underline{Z}'_{1L}$:

$$\underline{Z}_R = x \cdot \underline{Z}'_{1-L} + y \cdot \underline{Z}'_{1-L} \times$$

$$\times \left(\frac{\underline{I}_{Ф-T} \cdot \underline{Z}''_{1-L} + \underline{I}_{E-T} \cdot \underline{Z}''_{E-L}}{\underline{I}_{Ф-L} \cdot \underline{Z}''_{1-L} + \underline{I}_{E-L} \cdot \underline{Z}''_{E-L}} \right), \quad (3.106)$$

где выражение в скобках определяет погрешность измерений.

При увеличении мощности заземленного трансформатора его влияние, естественно, возрастает.

На линиях с трансформаторными отпайками возникает проблема определения повреждения (пуска защиты) и обеспечения защищаемых зон. Наиболее простым способом является использование метода симметричных составляющих для определения полного сопротивления, измеряемого реле. Основы этого расчёта рассмотрены на следующем примере воздушной линии с односторонним питанием и трансформаторной отпайкой (рис. 3.112). Там же представлена эквивалентная схема замещения для однофазного короткого замыкания.

Для расчёта величин $\underline{U}_A$ и $\underline{I}_A$ в месте установки реле используются следующие выражения:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{K1} + \underline{Z}_{1AK} \cdot \underline{I}_{A1}; \quad (3.107)$$

$$\underline{U}_{A2} = \underline{U}_{K2} + \underline{Z}_{1AK} \cdot \underline{I}_{A2}; \quad (3.108)$$

$$\underline{U}_{A0} = \underline{U}_{K0} + \underline{Z}_{0BK}(\underline{I}_{A0} + \underline{I}_{0T}) + \underline{Z}_{0AB} \cdot \underline{I}_{A0}, \quad (3.109)$$

где

$$\underline{U}_{K1} + \underline{U}_{K2} + \underline{U}_{K0} = 0 \text{ и}$$

$$\underline{Z}_{0AB} + \underline{Z}_{0BK} = \underline{Z}_{0AK}. \quad (3.110)$$

В результате:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = \underline{Z}_{1AK} \cdot (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}) +$$

$$+ \underline{Z}_{0AK} \cdot \underline{I}_{A0} + \underline{Z}_{0BK} \cdot \underline{I}_{0T}; \quad (3.111)$$

$$\underline{I}_{A\text{-}ф} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0};$$

$$\frac{\underline{I}_{КЗ}}{3} = \frac{\underline{E}_{Ф-E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}; \quad (3.112)$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{1A} + \underline{Z}_{1AK};$$

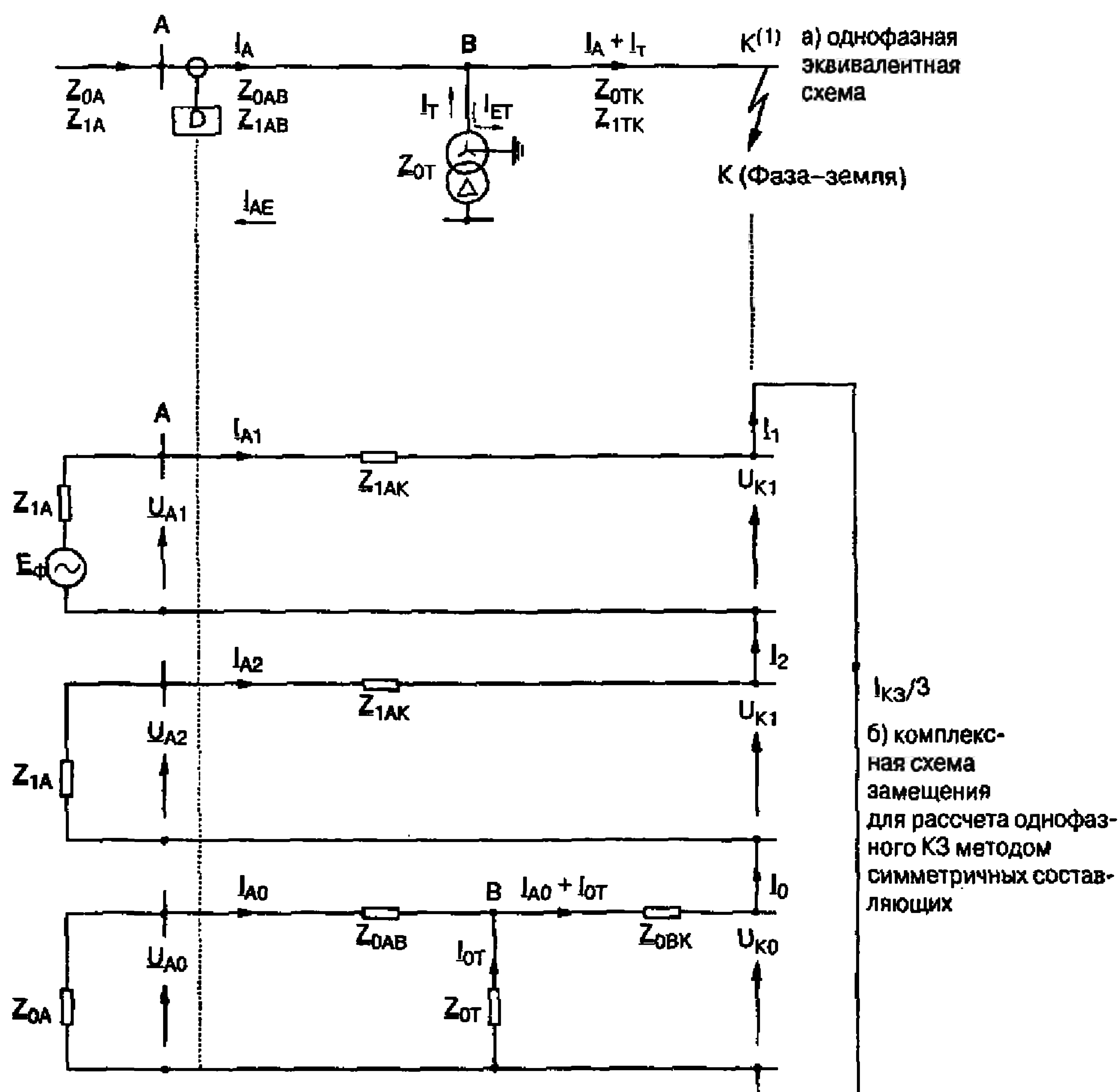


Рис. 3.112. Дистанционные измерения при $K^{(1)}$ на линиях с заземленным трансформатором на ответвлении (промежуточная подпитка током нулевой последовательности)

$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2;$

$$\underline{Z}_0 = \frac{(\underline{Z}_{0A} + \underline{Z}_{0AB}) \cdot \underline{Z}_{0T}}{\underline{Z}_{0A} + \underline{Z}_{0AB} + \underline{Z}_{0T}} + \underline{Z}_{0BK};$$

$$\frac{\underline{I}_{КЗ}}{3} = \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0;$$

$$\underline{I}_{A0} = \frac{\underline{Z}_{0T}}{\underline{Z}_{0A} + \underline{Z}_{0AB} + \underline{Z}_{0T}} \cdot \underline{I}_0. \qquad (3.113)$$

Это может быть использовано для расчёта полного сопротивления по выражению (3.29):

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_{Aф} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{AE}}.$$

Числовой пример

Воздушная линия 110 кВ с трансформатором мощностью 40 МВА.

Параметры линии:

$\underline{Z}'_{1L} = 0{,}4$ Ом/км, $\underline{Z}'_{0L} = 1{,}1$ Ом/км.

Участки:

$l_{A\text{-}B} = 10$ км и $l_{B\text{-}K} = 10$ км;

система:

$S_{КЗ}$ = 1000 МВА; $X_0/X_1 = 1$;

трансформатор:

$S_{ном}$ = 40 МВА, $U_к$ = 10 %, $X_0/X_1 = 1$.

В результате:

$\underline{U}_A$ = 32,86 кВ, $\underline{I}_{A-ф}$ = 2534 А и $\underline{I}_{A-E}$ = –1675 А,

$\underline{Z}_A$ = 10,6 Ом.

$$\underline{k}_0 = Z'_{EL}/Z'_{1L} = \frac{(Z'_{0L} - Z'_{1L})}{3Z'_{1L}} = 0{,}583.$$

Полное сопротивление линии: Z_{1AK} = = 20 · 0,4 = 8 Ом.

Погрешность измерений: $F = \frac{10{,}6-8}{8} \times$ ×100 = 32,5 %.

Отсюда видно, что, если к линии присоединены несколько трансформаторов с заземлёнными нетралями, то защищаемые зоны существенно уменьшаются. Это уменьшение можно компенсировать увеличением коэффициента k_0 (в нашем примере его необходимо увеличить до k_0 = = 1,28). На защищаемую зону междуфазных систем измерения наличие/отсутствие заземлённых трансформаторов не влияет.

3.5.3. Параллельные линии

Когда воздушные линии проходят параллельно, между параллельными проводниками существует взаимная индуктивная связь. При практических расчётах на транспонированных линиях этим эффектом можно пренебречь для составляющих прямой и обратной последовательности (взаимная индуктивность составляет менее 5 % собственного полного сопротивления). Это означает, что в нагрузочных режимах и при всех видах КЗ без земли линии можно считать независимыми.

При возникновении замыканий на землю сумма токов в проводниках равна не 0, а утроенному току нулевой последовательности, т. е. току (I_E) в земле. Можно считать, что этот суммарный ток протекает по фиктивному проводнику, помещённому в геометрический центр фазных проводников трёхфазной системы. Две параллельные линии заменяются двумя одиночными параллельными проводниками с контуром для возврата тока по земле, для которых и должно быть рассчитано взаимное индуктивное сопротивление. При наличии заземленных тросов появляется дополнительная электромагнитная связь, которую необходимо учитывать в расчётах.

Эквивалентный контур «фаза—земля» соответствует схеме замещения нулевой последовательности линии при использовании метода симметричных составляющих. По определению, ток в схеме замещения нулевой последовательности равен части суммарного тока, т. е. 1/3 тока в земле ($\underline{I}_0 = \underline{I}_E/3$). Поэтому, полное сопротивление нулевой последовательности в 3 раза больше сопротивления проводник-земля.

Сопротивление взаимоиндукции двух параллельных линий без заземляющего проводника определяется следующим выражением: [3.32, 3.33]

$$\underline{Z}'_{0M} = \left(3 \cdot R'_E + j \cdot \omega \cdot 6 \cdot \ln\frac{\delta}{A_L}\right) \times 10^{-4}\ \text{Ом/км}, \quad (3.114)$$

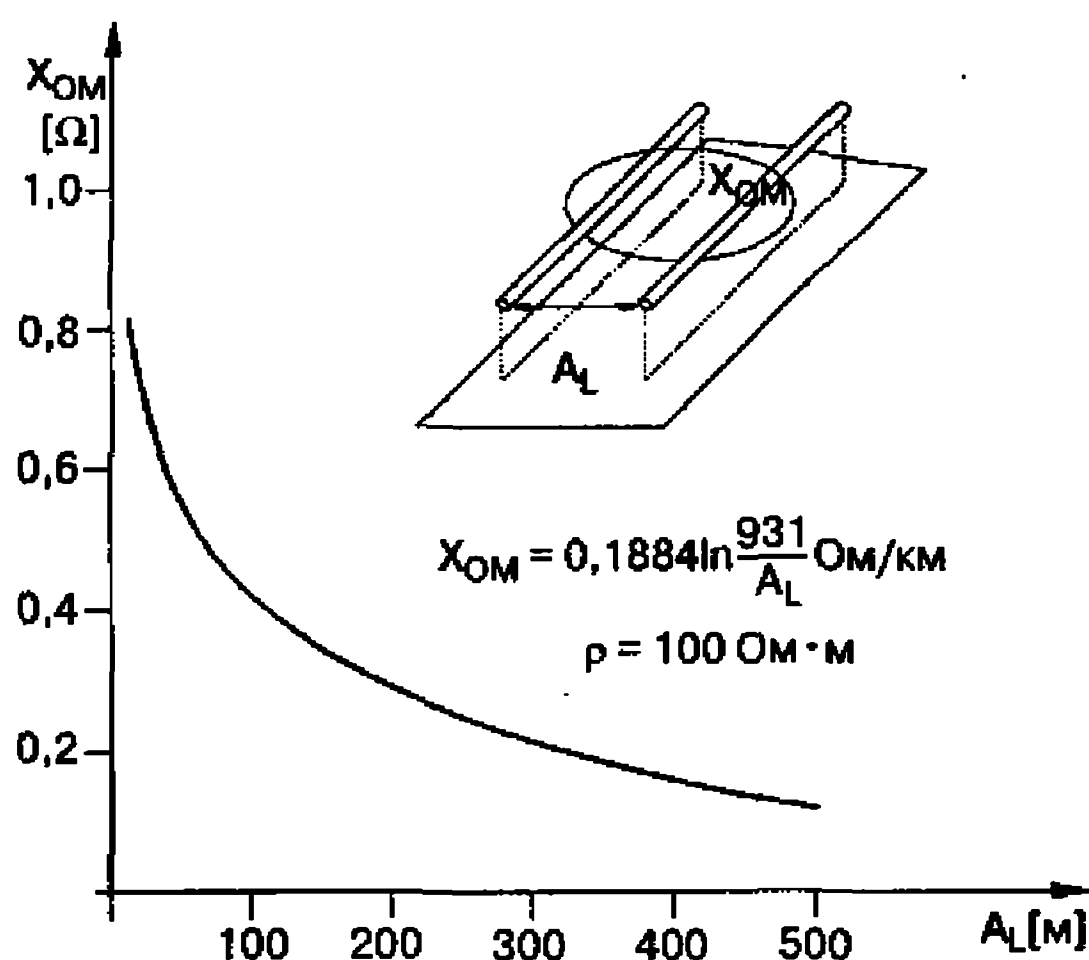
где:

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ — угловая частота, 1/с;

$\delta = 1650\sqrt{\frac{\rho}{\omega}}$ — глубина проникновения (эквивалентная глубина возврата тока через землю), м; ρ — удельное сопротивление земли в Ом · м;

$R'_E = \pi \cdot \omega \cdot 10^{-4}/2$ сопротивление земли, Ом/км;

A_L среднее геометрическое расстояние между проводниками обеих трёхфазных систем (приблизительно равно расстоянию между опорами 2-х линий).



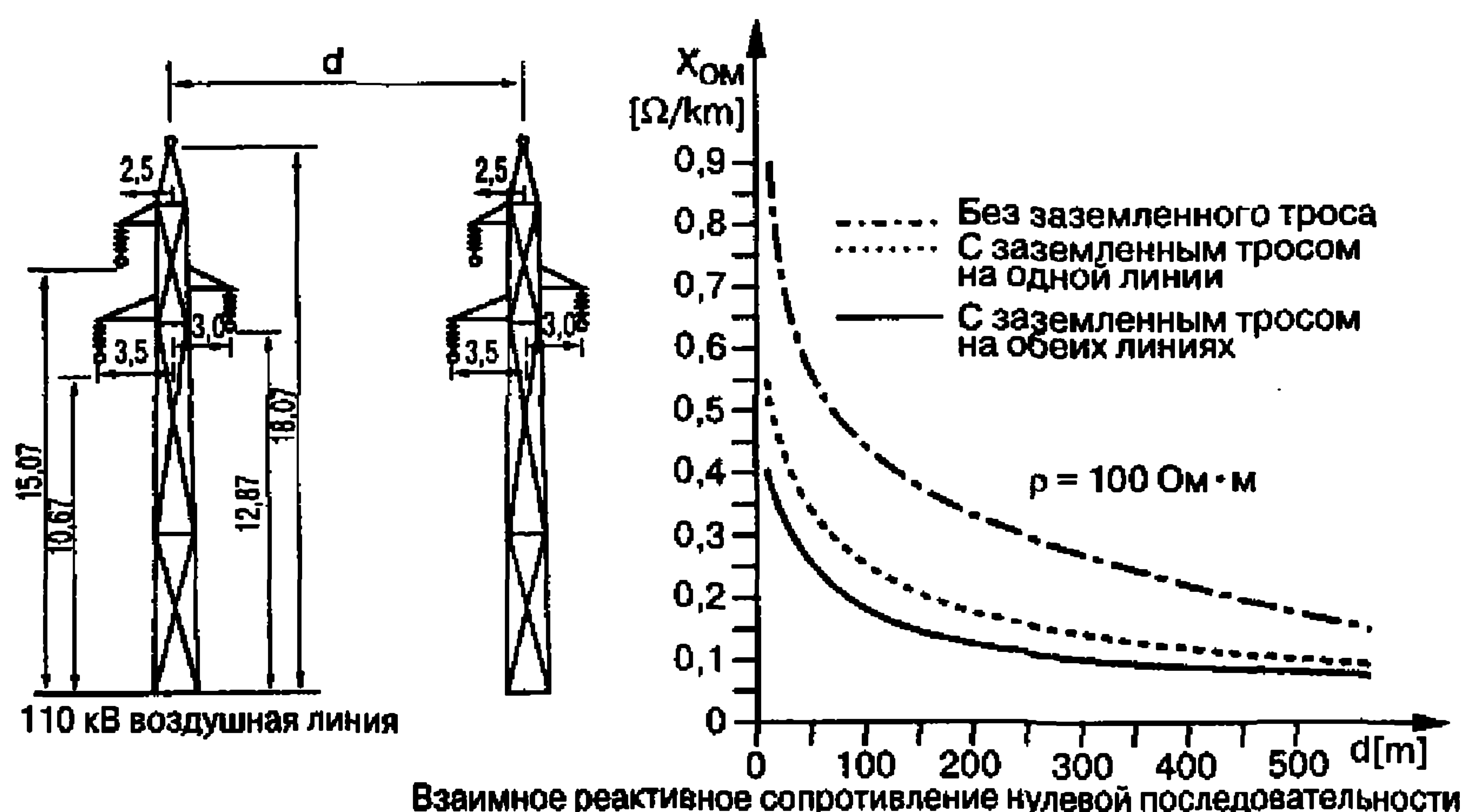
а) Взаимное индуктивное сопротивление двух контуров фаза-земля.

При частоте системы 50 Гц и удельном активном сопротивлении земли 100 Ом/м:

$$\underline{Z}_{0M} = 0{,}15 + j0{,}1884 \times \times \ln(931/A_л)\ [\text{Ом/км}]. \qquad (3.115)$$

Отсюда видно, что взаимная индуктивность имеет логарифмическую зависимость от расстояния между опорами и, поэтому, убывает относительно медленно с увеличением расстояния между опорами (рис. 3.113). Даже при довольно большом расстоянии между линиями взаимная индуктивность всё равно присутствует.

Ток нулевой последовательности одной цепи наводит напряжение в другой цепи и наоборот (рис. 3.114). Линии могут идти параллельно на протяжении всей длины, либо только на протяжении какой-то её части. Если линии соединены в параллель на обоих концах, существует постоянное отношение между собственной индуктивностью одиночной линии $\underline{Z}_{0L}$, собственной индуктивностью двухцепной линии $\underline{Z}_{0дв}$ и взаимной индуктивностью $\underline{Z}_{0M}$ (рис. 3.115).



б) Вычисленное сопротивление взаимоиндукции воздушных двух линий 110 кВ

Рис. 3.113. Сопротивление нулевой последовательности воздушных линий со взаимоиндукцией

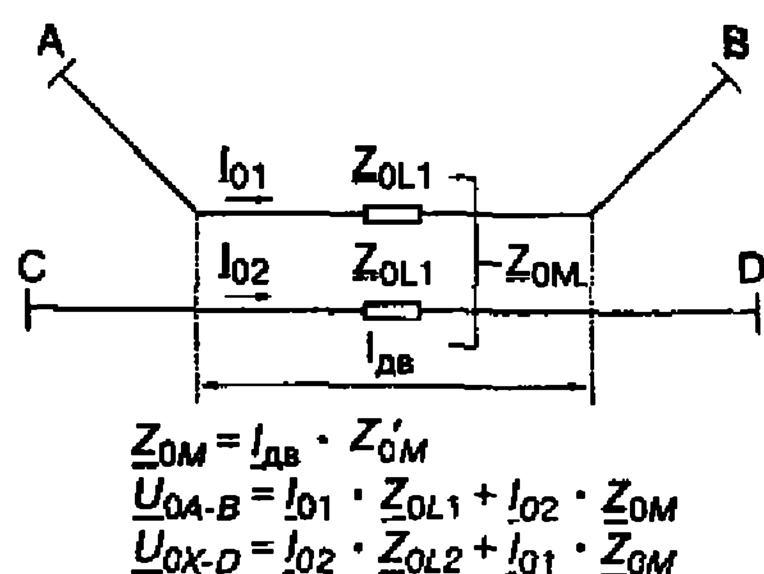


Рис. 3.114. Напряжение нулевой последовательности на параллельных воздушных линиях

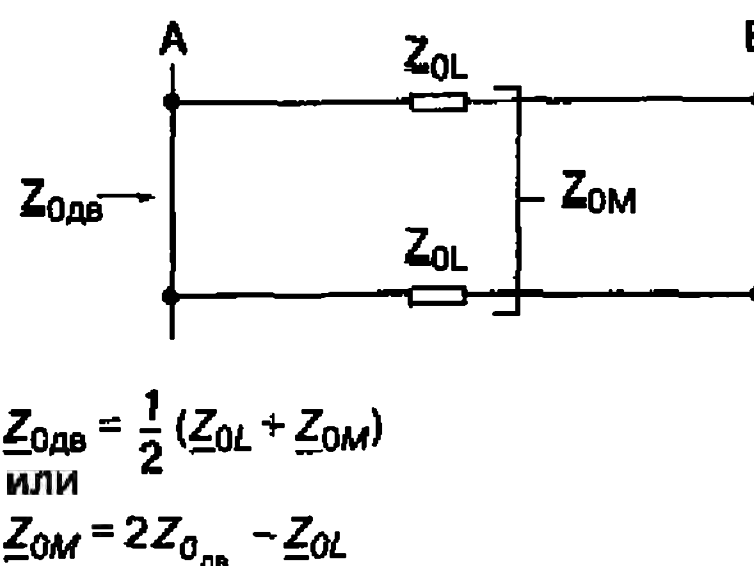


Рис. 3.115. Сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии

Это может быть использованы, например, для расчёта сопротивления взаимоиндукции Z_{0M}, если известны сопротивления нулевой последовательности одиночной и параллельных линий.

Определение собственной и взаимной индуктивности обычно производится с помощью расчётов, основанных на значениях параметров опор и расстояний между ними. Однако, также возможно определить эти значения с помощью измерений, которые должны производиться в соответствии с принципом, представленным на рис. 3.116.

Внимание!

Измерения должны производиться на *низком напряжении. Тем не менее, опасность остаётся, т. к. соседние линии или атмосферные явления могут спровоцировать появление высоких напряжений на линии, на которой производятся измерения. Необходимо принимать соответствующие меры безопасности.*

Влияние взаимоиндуктивности на дистанционные измерения

Суммарный ток (ток стекания на землю) параллельных линий вызывает появление продольного напряжения на контуре повреждения и изменение измеряемого напряжения в месте установки реле. Появляются ошибки в измерениях.

Это влияние, как будет показано ниже, зависит от параметров (конфигурации) системы.

Следует отметить:

ошибка измерений положительна (измеренное сопротивление больше дейст-

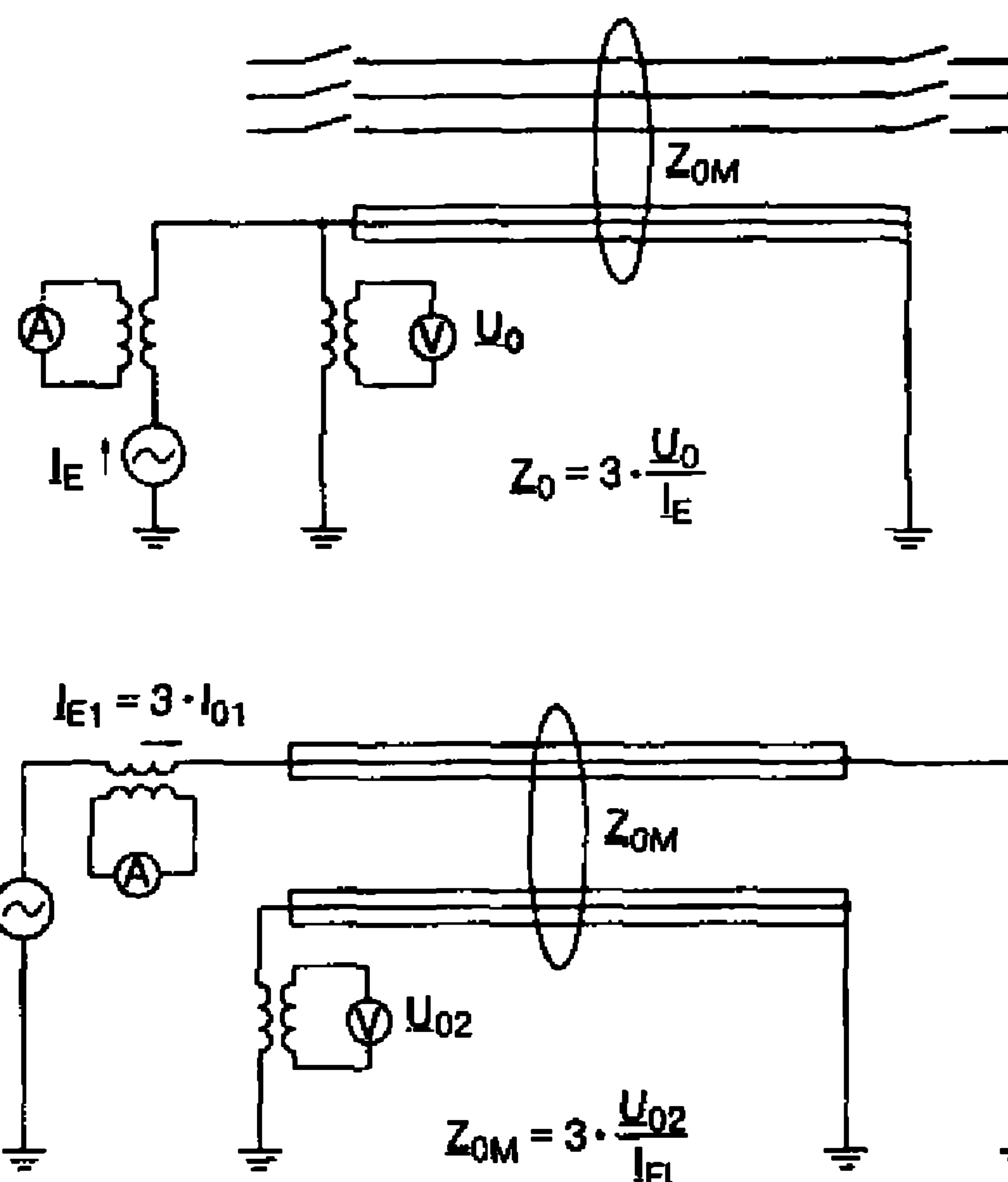


Рис. 3.116. Определение сопротивлений нулевой последовательности Z_{0L} и Z_{0M} при помощи измерений

вительного, что приводит к уменьшению защищаемой зоны), если суммарные токи в обеих системах протекают в одном и том же направлении;

ошибка измерений отрицательна (излишний охват), если суммарные токи текут в противоположных направлениях.

Если линии относятся к разным системам (наихудший случай: различные уровни напряжений), нет прямой взаимосвязи между суммарными токами. Ошибка измерений может иметь любой знак.

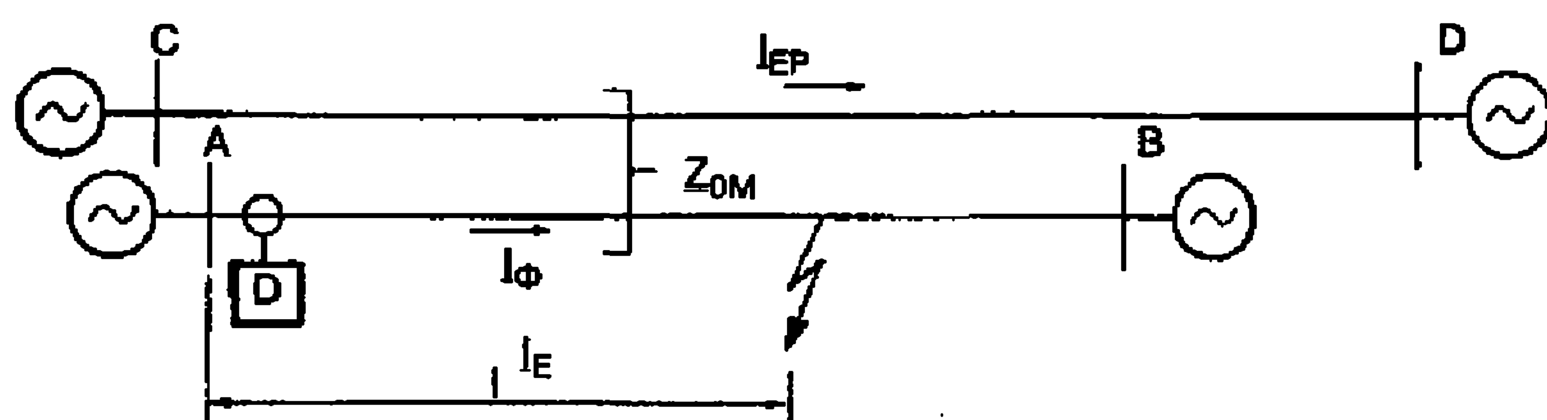
В случае, когда линии на обоих концах соединены через общие шины, распределение тока происходит в соответствии с мощностью источников питания и условиями работы линий.

Сначала рассмотрим схему, представленную на рис. 3.117.

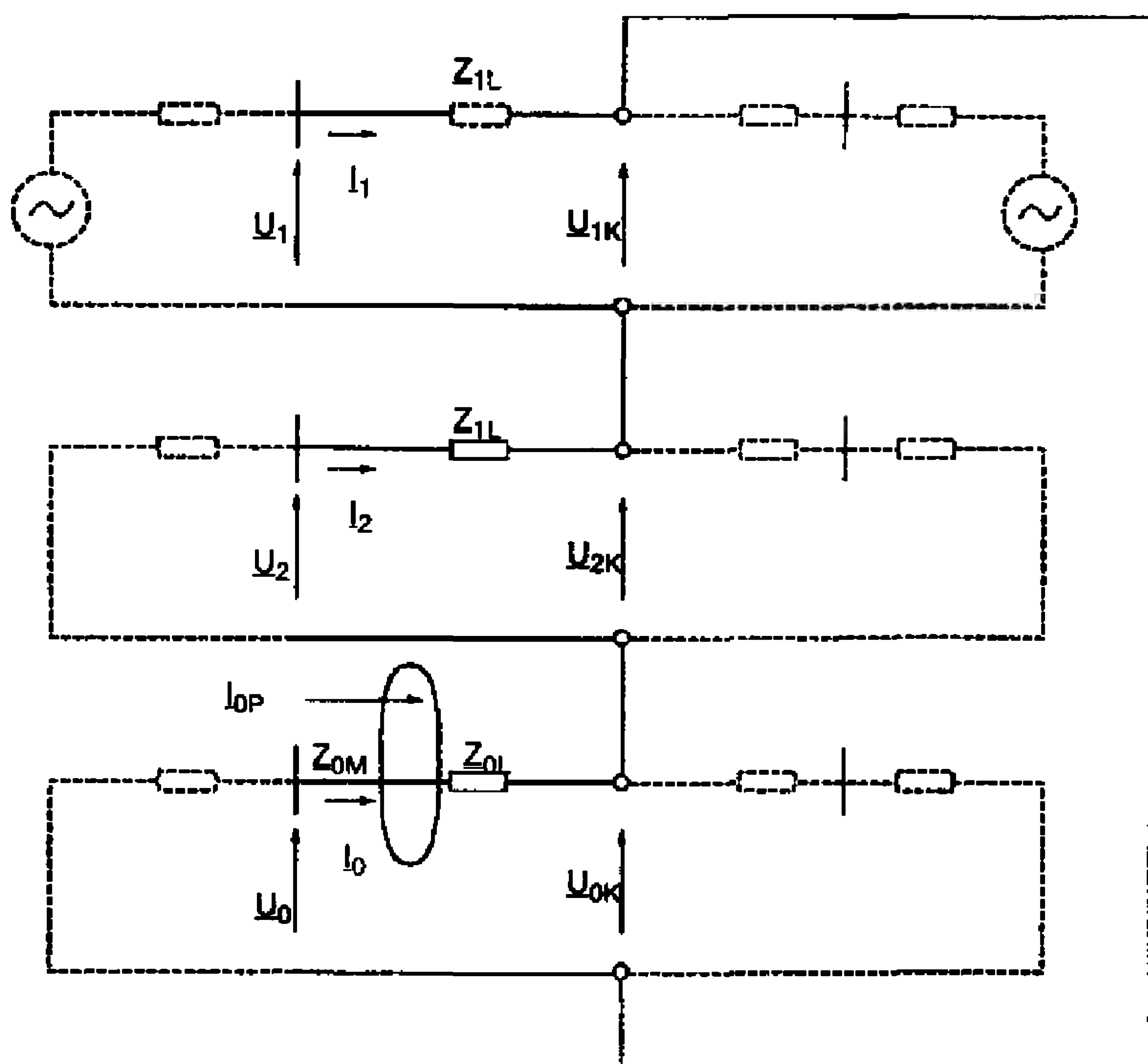
Для комплексной схемы замещения (однофазное КЗ) можно записать следующие уравнения:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{1L} \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_{1K}; \qquad (3.116)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_{1L} \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_{2K}; \qquad (3.117)$$



а) эквивалентная схема замещения для одной фазы



б) комплексная схема замещения для $K^{(1)}$

Рис. 3.117. Дистанционные измерения на параллельных линиях

$$\underline{U}_0 = \underline{Z}_{0L} \cdot \underline{I}_0 + \underline{Z}_{0M} \cdot \underline{I}_{0P} + \underline{U}_{0K}, \quad (3.118)$$

где $\underline{I}_{0P}$ — ток в параллельной цепи

Суммируя выражения (3.116), (3.117) и (3.118), получаем:

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = \underline{U}_A;$$

$$\underline{U}_{1K} + \underline{U}_{2K} + \underline{U}_{0K} = 0.$$

В результате:

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_{1L} \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2) + \underline{Z}_{0L} \cdot \underline{I}_0 + \underline{Z}_{0M} \cdot \underline{I}_{0P} = \\ = \underline{Z}_{1L}(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0) + (\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_{1L}) \cdot \underline{I}_0 + \\ + \underline{Z}_{0M} \cdot \underline{I}_{0P}; \quad (3.119)$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_\Phi \cdot \underline{Z}_{1L} + \frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_{1L}}{3} \cdot \underline{I}_E + \\ + \frac{\underline{Z}_{0M}}{3} \cdot \underline{I}_{EP}, \quad (3.120)$$

где $\underline{I}_E = 3 \cdot \underline{I}_0$, $\underline{I}_{EP} = 3 \cdot \underline{I}_{0P}$ — для поврежденной и неповрежденной цепей, соответственно,

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = \underline{I}_\Phi \text{ и } \frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_{1L}}{3} = \underline{Z}_E. \quad (3.121)$$

С учётом этого напряжение в месте установки реле можно выразить как:

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_{1L} \cdot \left(\underline{I}_\Phi + \frac{\underline{Z}_{EL}}{\underline{Z}_L} \cdot \underline{I}_E + \right. \\ \left. + \frac{\underline{Z}_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}_{1L}} \cdot \underline{I}_{EP}\right). \quad (3.122)$$

Тогда измеряемое сопротивление может быть рассчитано по формуле (3.29):

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_\Phi + \underline{k}_0 \underline{I}_E} = \\ = \frac{\underline{Z}_{1L}\left(\underline{I}_\Phi + \frac{\underline{Z}_{EL}}{\underline{Z}_{1L}} \cdot \underline{I}_E + \frac{\underline{Z}_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}_{1L}} \cdot \underline{I}_{EP}\right)}{\underline{I}_\Phi + \underline{k}_0 \underline{I}_E}. \quad (3.123)$$

При использовании коэффициента компенсации нулевой последовательности, соответствующего параметрам защищаемой линии $\underline{k}_0 = \frac{\underline{Z}_{EL}}{\underline{Z}_{1L}}$, получаем:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_{1L} \cdot \left(1 + \frac{\frac{\underline{Z}_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}_{1L}} \cdot \underline{I}_{EP}}{\underline{I}_\Phi + \frac{\underline{Z}_{EL}}{\underline{Z}_{1L}} \cdot \underline{I}_E}\right), \quad (3.124)$$

где второе слагаемое в скобках определяет погрешность измерения.

Можно видеть, что погрешность измерений зависит от направления и значения токов нулевой последовательности в обеих линиях.

Рассмотрим следующий простой пример: На рис. 3.118 представлена двухцепная линия с односторонним питанием. Рассмотрим поведение дистанционных реле Z1 и Z2 при однофазном замыкании на землю на одной из линий.

В этом случае можно использовать следующие соотношения между токами:

$$\underline{I}_{\Phi 1} = \underline{I}_{E1},\ \underline{I}_{\Phi 2} = \underline{I}_{E2} \text{ и } \underline{I}_{E2} = \frac{x}{2l - x}\underline{I}_{E1}.$$

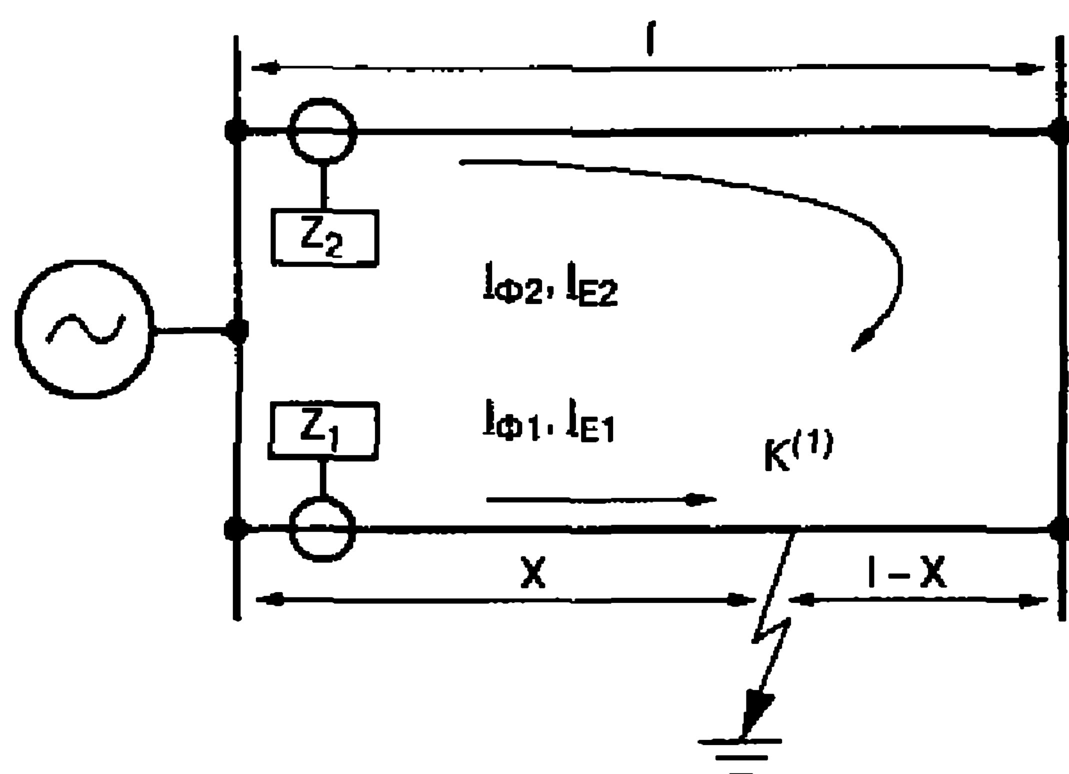


Рис. 3.118. Однофазное КЗ на землю на одной из параллельных линий в сети с односторонним питанием

Реле Z1 на поврежденной линии.

Из выражения (3.123):

$$\underline{Z}_1 = \frac{x}{l}\cdot\underline{Z}_L + \frac{x}{l}\cdot\underline{Z}_L\frac{\frac{\underline{Z}_{0M}}{3\cdot\underline{Z}_L}\cdot\frac{x}{2l-x}}{1+\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}}. \qquad (3.125)$$

Второе слагаемое определяет погрешность измерения.

Реле Z2 на неповрежденной параллельной линии:

Исходя из рис. 3.118, можно записать следующее выражение для напряжения на контуре короткого замыкания:

$$\underline{U}_{(Ф\text{-}E)2} = (2l-x)(\underline{Z}_L\cdot\underline{I}_{Ф2}+\underline{Z}_E\cdot\underline{I}_{E2}) + x\cdot\frac{\underline{Z}_{0M}}{3}\underline{I}_{E1} - 2(l-x)\frac{\underline{Z}_{0M}}{3}\underline{I}_{E2}. \qquad (3.126)$$

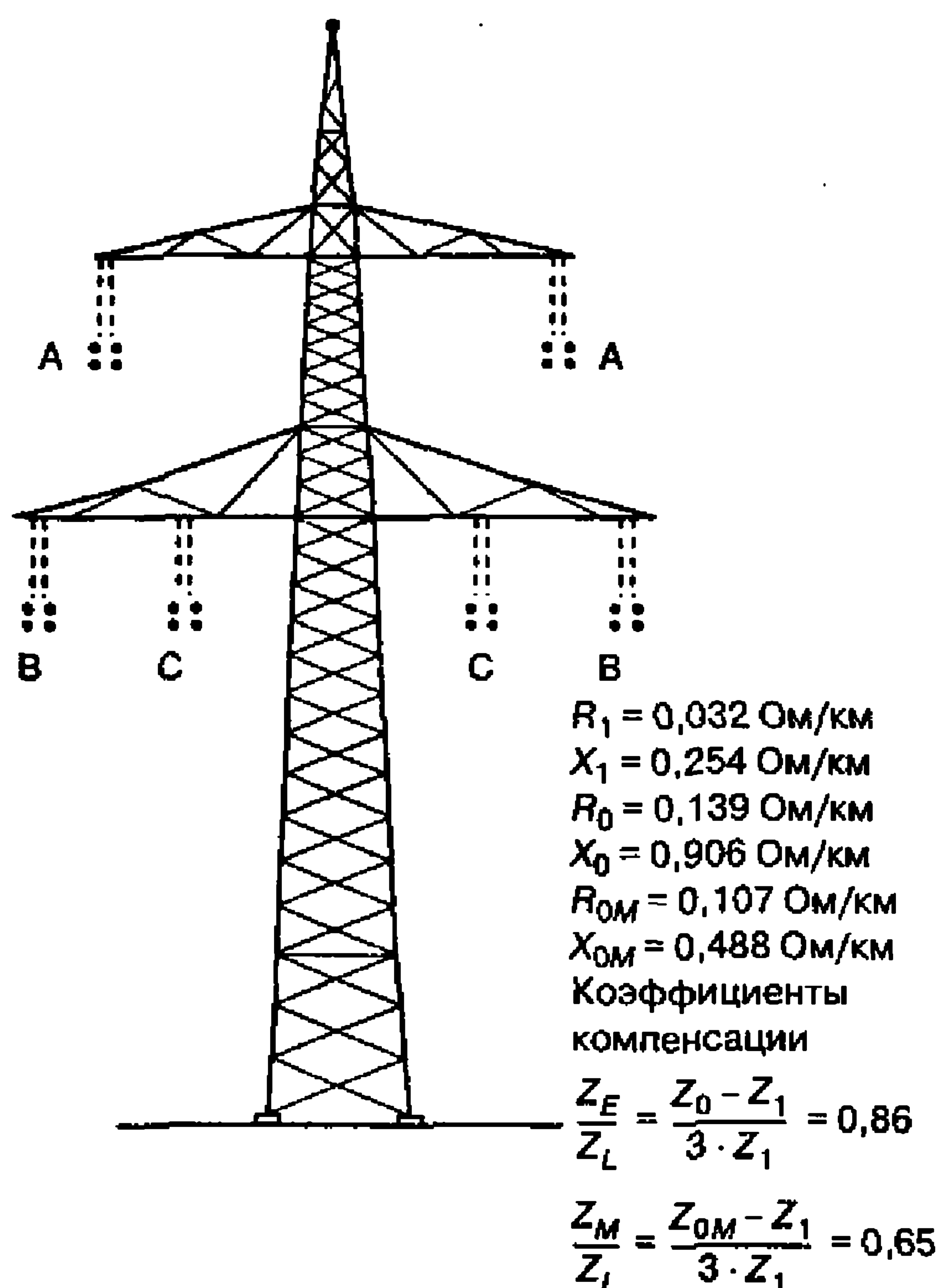


Рис. 3.119. Типичные значения сопротивлений для двухцепной линии

Подставляя $\underline{U}_{(Ф\text{-}E)2}$ в выражение (3.29) с учетом приведенных выше соотношений для токов, получаем:

$$\underline{Z}_2 = (2\cdot l - x)\cdot\underline{Z}_L + \frac{x\cdot\frac{\underline{Z}_{0M}}{3\cdot\underline{Z}_L}}{1+\frac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L}}. \qquad (110)$$

Второе слагаемое определяет ошибку измерений.

На рис. 3.119 представлены типичные значения сопротивлений и коэффициентов компенсации нулевой последовательности для двухцепной линии 400 кВ (для упрощения вычислений использовались только амплитудные значения).

Подставляя эти значения в выражения (3.125) и (3.127), можно подсчитать ошибку измерений для двухцепной линии с односторонним питанием. Результаты расчётов представлены на рис. 3.120. Как и предполагалось, оба реле на питающем конце определяют большее значение сопротивления, чем на самом деле ($\underline{I}_{E1}$ и $\underline{I}_{E2}$ имеют одинаковые направления). Наибольшее значение ошибки возникает в случае замыкания в конце линии (35 %!).

Для сравнения на рис. 3.121 представлена зависимость ошибки измерения реле на поврежденной линии от положения точки замыкания в случае двухцепной линии с двусторонним питанием. Очевидно, что ошибка отрицательна для замыканий на первых 50—80 процентах линии, т. е. на той части линии, где токи $\underline{I}_{E1}$ и $\underline{I}_{E2}$ имеют противоположные направления.

Это является положительным моментом, если используется схема защиты с разрешающим сигналом для ступени с неполным охватом, т.к. одна из защит всегда «видит» замыкание ближе и, поэтому, может сформировать разрешающий сигнал на отключение даже при ма-

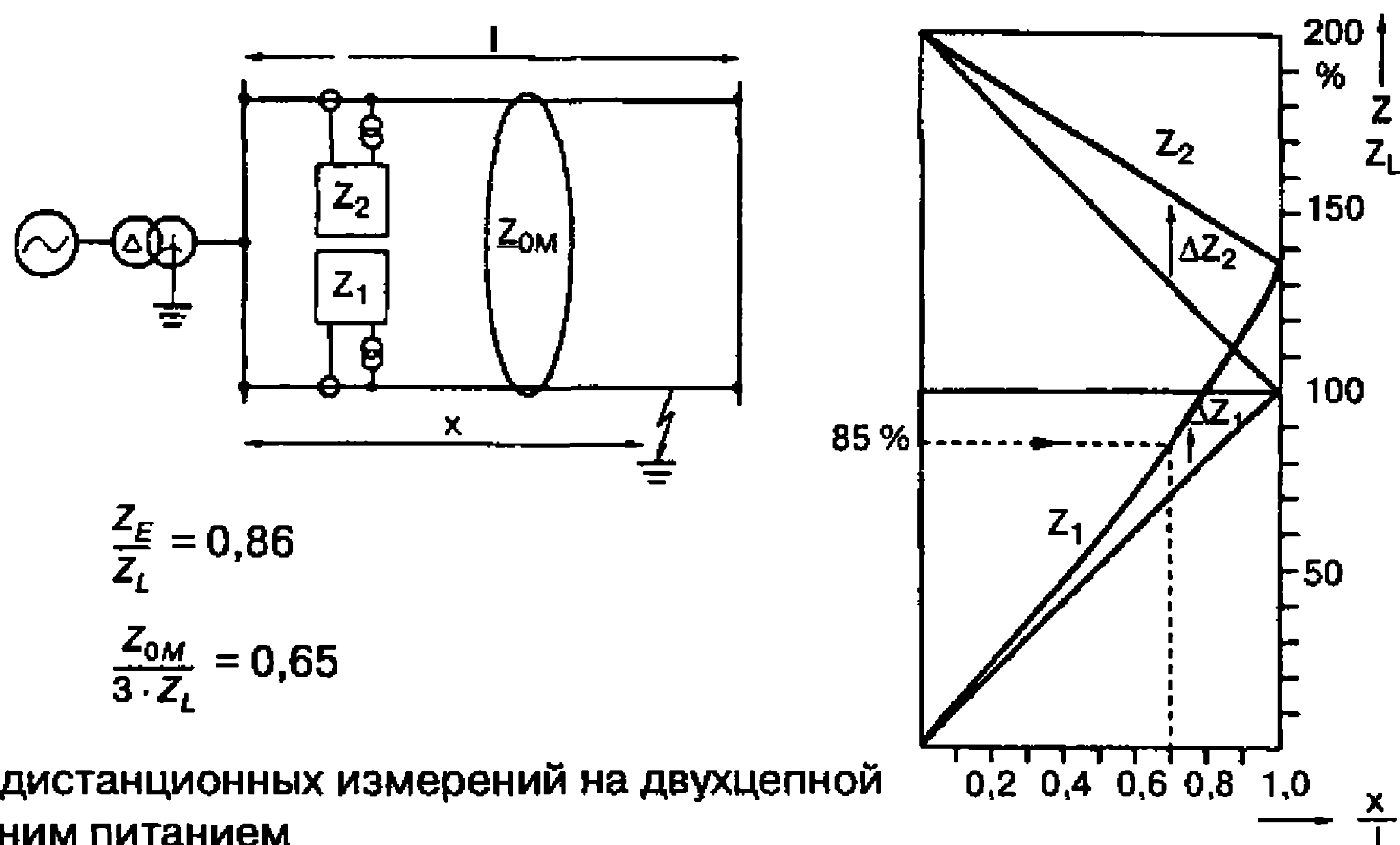


Рис. 3.120. Ошибки дистанционных измерений на двухцепной линии с односторонним питанием

леньких значениях уставки ступени с неполным охватом.

Влияние параллельной линии сильно зависит от режимов работы двухцепной линии, проявляющихся в изменении распределения токов нулевой последовательности (рис. 3.122). Понятно, что если токи нулевой последовательности I_E и I_{EP} имеют одинаковые направления, измеряемое полное сопротивление увеличивается, и уменьшает-

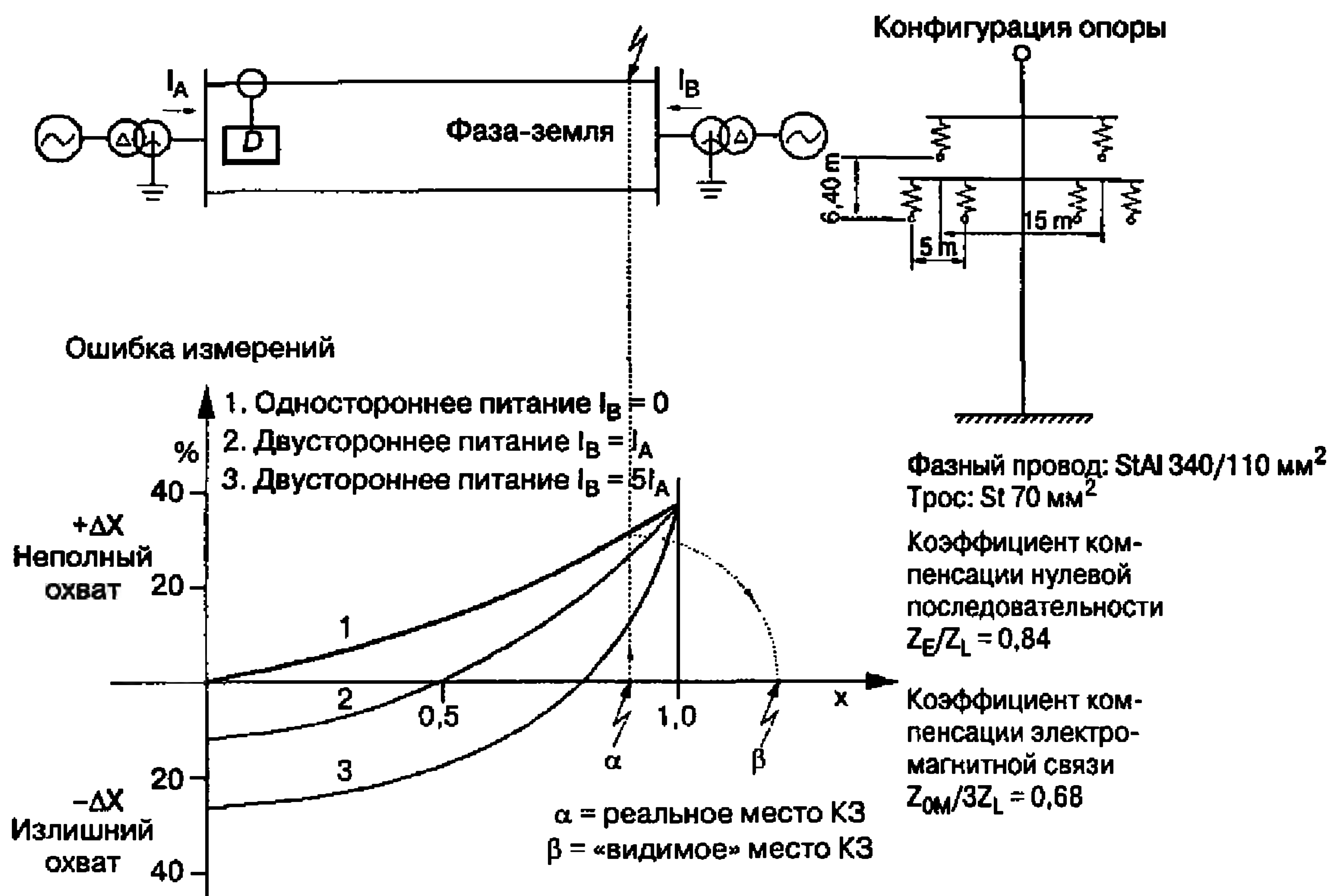
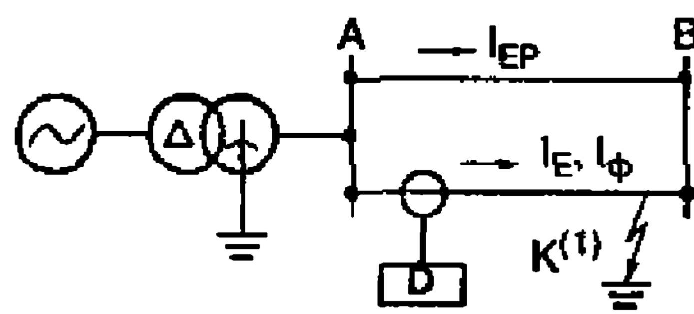
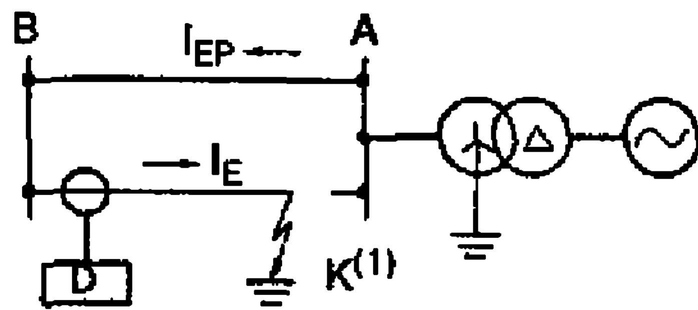


Рис. 3.121. Ошибки дистанционных измерений при КЗ на землю на одной из параллельных линий при двустороннем питании



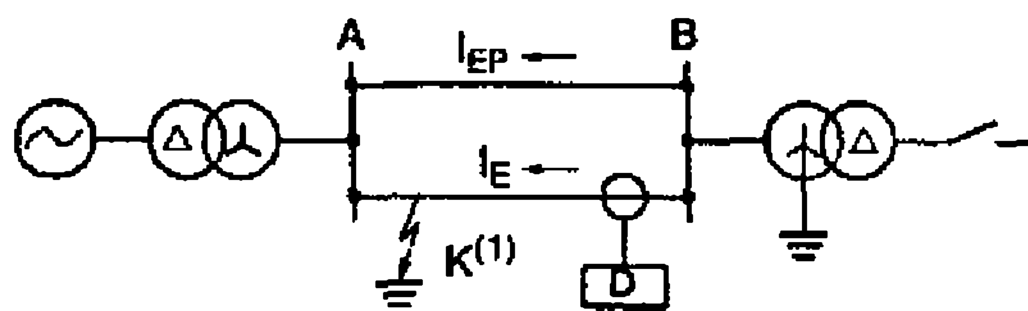
$$\Delta Z = \frac{k_{0M}}{1 + k_0} \cdot Z_L = +24\ \%\ \text{от}\ Z_L$$

Однофазное КЗ в конце одной из линий, вблизи шин подстанции В.



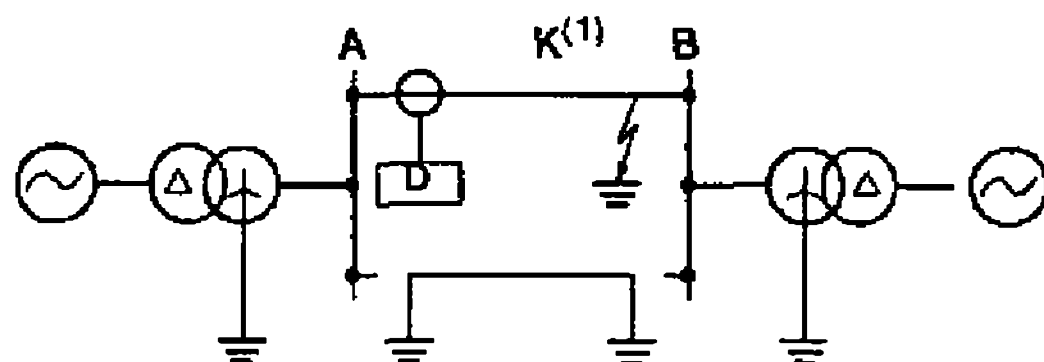
$$\Delta Z = -\frac{k_{0M}}{1 + k_0} \cdot Z_L = -24\ \%\ \text{от}\ Z_L$$

Однофазное КЗ на землю вблизи шин подстанции А при отключенном выключателе с этой же стороны



$$\Delta Z = \frac{3k_{0M}}{1 + k_0} \cdot Z_L = \frac{Z_{0M}}{Z_0} \cdot Z_L = +40\ \%\ \text{от}\ Z_L$$

Однофазное КЗ в конце одной из линий, вблизи шин подстанции А



$$\Delta Z = -Z_L \cdot \frac{k_{0M} \cdot \frac{Z_{0M}}{Z_{0L}}}{1 + k_0} = -10\ \%\ \text{от}\ Z_L$$

Однофазное КЗ на землю вблизи шин подстанции В. Вторая линия отключена и заземлена с обоих концов

Рис. 3.122. Дистанционная защита параллельных линий. Зависимость измеряемых при КЗ на землю сопротивлений от режима включения цепей

ся, если токи имеют противоположные направления.

Уставки ступеней защит на двухцепной линии должны быть подобраны так, чтобы, с одной стороны, защищаемая зона была достаточной, если обе линии включены в работу; а с другой стороны, нельзя допускать слишком большого излишнего охвата, если одна из параллельных линий отключена и заземлена на обоих концах (см. пример использования в п.п. 7.1).

Компенсация влияния параллельной линии

Из выражения (3.123) видно, что сопротивление замыкания измеряется правильно, если к знаменателю прибавить

$$\frac{Z_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}_L} \cdot \underline{I}_{EP}.$$

При нормальной уставке $\underline{k}_0 = \underline{Z}_{El}/\underline{Z}_{1L}$ числитель и знаменатель становятся равными и результат измерения равен $\underline{Z}_{1L}$, т. е. влияние параллельной линии компенсируется.

Соответственно, ток стекания на землю параллельной линии должен использоваться для измерений с соответствующим весовым коэффициентом.

Эта процедура в общем случае называется компенсацией влияния параллельной линии.

Выражение (3.29) для вычисления полного сопротивления контура замыкания на землю определяется следующим образом:

$$\underline{Z}_{Ф\text{-}E} = \frac{U_{Ф\text{-}E}}{\underline{I}_{Ф\text{-}E} + \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_E + \underline{k}_{0M} \cdot \underline{I}_{EP}}, \qquad (3.128)$$

где $\underline{k}_{0M} = \dfrac{\underline{Z}_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}_L}$.

В электромагнитных реле проблема компенсации просто решалась добавлением тока нулевой последовательности параллельной линии к току нулевой последовательности защищаемой линии через промежуточные трансформаторы.

В цифровых реле используется дополнительный измерительный вход, куда может быть подан ток нулевой последовательности параллельной линии. Сложение производится в цифровой форме. Коэффициент компенсации устанавливается посредством программного обеспечения.

Сравнение токов нулевой последовательности.

Компенсация влияния параллельной линии (компенсация взаимоиндукции), описанная выше, естественно, действует не только при замыканиях на защищаемой линии, но и при замыканиях на параллельной линии.

Для того, чтобы продемонстрировать это, снова воспользуемся примером на рис. 3.120.

Подставляя (3.126) в (3.128), получаем выражение для измеряемого полного сопротивления на неповрежденной линии при однофазном замыкании на землю на параллельной линии:

$$\underline{Z}_2^* = \underline{Z}_L \cdot (2l - x) + \frac{\left(\dfrac{x}{2l-x} - \dfrac{2l-x}{x}\right) \cdot \dfrac{\underline{Z}_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}_L}}{1 + \dfrac{\underline{Z}_E}{\underline{Z}_L} + \dfrac{\underline{Z}_{0M}}{3 \cdot \underline{Z}_L} \cdot \dfrac{2l-x}{x}} \times$$

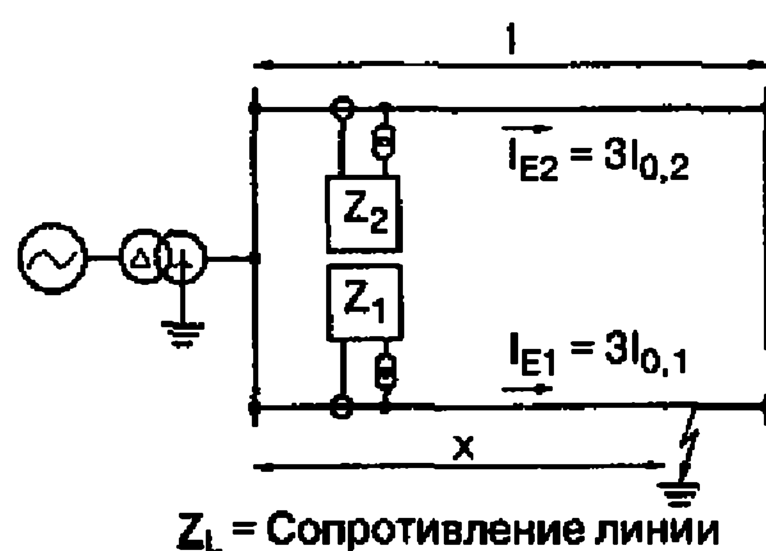
$$\times \underline{Z}_L \cdot (2l - x). \qquad (3.129)$$

Второе слагаемое определяет ошибку измерений.

Измеряемое сопротивление при использовании компенсации влияния параллельной линии представлено на рис. 3.123. Сравнение этого рисунка с рис. 3.120 показывает, что теперь реле на поврежденной линии измеряет точное значение расстояния до места повреждения, т. е. измеряемое сопротивление линейно увеличивается с увеличением расстояния до места замыкания.

Расстояние до места замыкания, измеряемое реле на неповреждённой линии слишком мало из-за влияния взаимоиндукции параллельных линий.

Это понятно, т.к. при близких КЗ по повреждённой линии протекает большой ток. Он наводит ток в неповреждён-



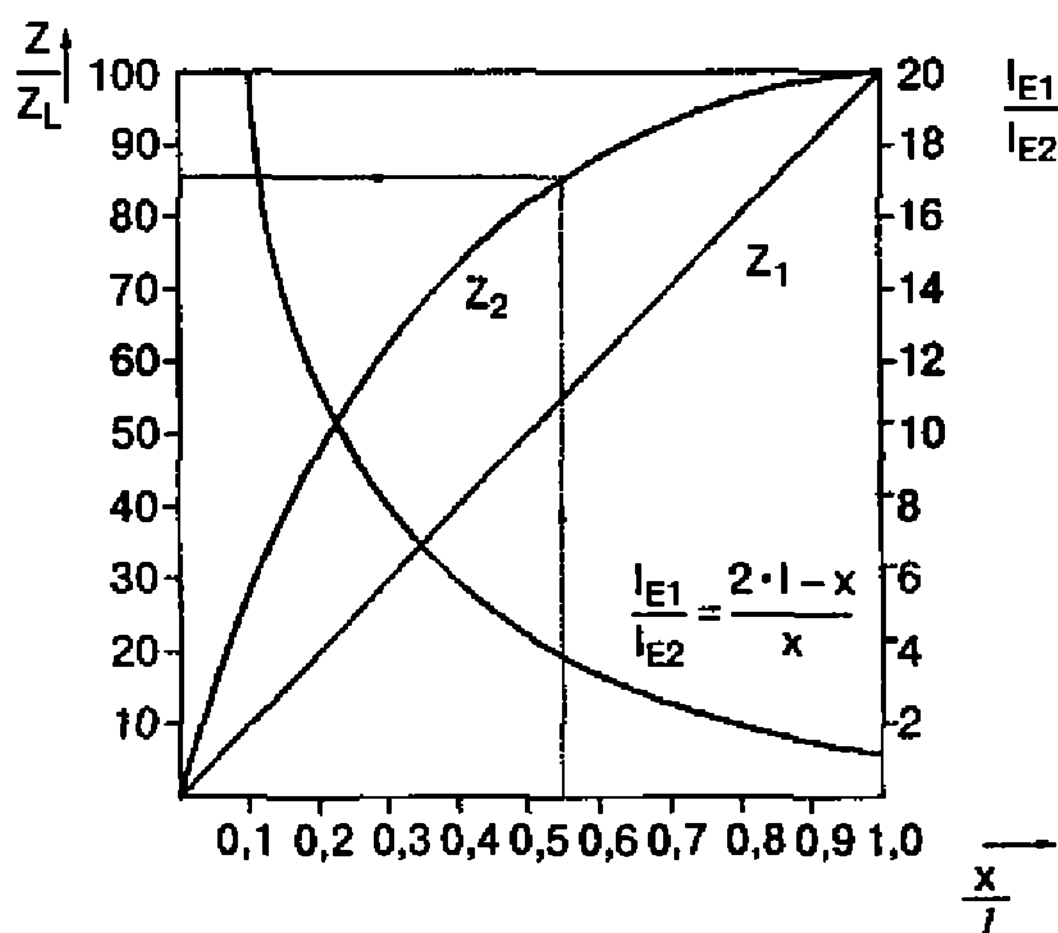


Рис. 3.123. Дистанционные измерения на двухцепной воздушной линии, компенсация влияния параллельных линий

ной линии, в результате чего установленное реле «видит» маленькое сопротивление.

Поэтому, например, при уставке, равной 85 % длины защищаемой линии, защита на неповрежденной линии вызовет отключение замыканий на первых 55 % длины линии (пунктирная линия).

Для того, чтобы предотвратить это, используется специальный орган, который сравнивает токи нулевой последовательности двух линий и блокирует компенсацию от параллельной линии, когда ток на параллельной линии превышает ток защищаемой линии на определённую величину.

Этот принцип основан на том, что ток нулевой последовательности на повреждённой линии всегда равен или больше соответствующего тока в неповрежденной параллельной линии.

Для двухцепной воздушной линии с односторонним питанием, в соответствии с рис. 3.123, существует следующее соотношение между положением точки короткого замыкания x и распределением токов нулевой последовательности:

$$\frac{\underline{I}_{E1}}{\underline{I}_{E2}} = \frac{2l-x}{x} = \frac{2-\frac{x}{l}}{\frac{x}{l}} = \frac{3\underline{I}_{0,1}}{3\underline{I}_{0,2}}. \qquad (3.130)$$

Таким способом можно определить, в какой защите должна действовать компенсация взаимоиндукции параллельной линии, т. е. уставкой в реле является не отношение токов, а отношение x/l в процентах.

Рассмотрим это на следующем числовом примере:

При уставке x/l = 85 % (типичная уставка), компенсация действует при замыканиях как на защищаемой линии, так и линии за удалённой станцией на 15 % длины параллельной линии для надежности. При этом уставка $\frac{I_{E1}}{I_{E2}}$ = 1,35.

Это означает, что компенсация от параллельной линии блокируется, когда ток нулевой последовательности параллельной линии достигает 135 % от тока защищаемой линии.

При этом необходимо учесть, что в случае замыканий на смежных линиях компенсация всегда действует, т. к. в этом случае токи в обеих цепях параллельных линий равны.

Поэтому, в любом случае защищаемые зоны резервных ступеней защит увеличиваются.

Использование компенсации влияния параллельной линии

Компенсация может быть использована только в том случае, если обе линии заканчиваются на одной и той же подстанции. Она всегда применяется на двухцепных воздушных линиях. Для линий, которые проходят параллельно только на части длины, компенсация находит ограниченное применение.

В любом случае рекомендуется использовать компенсацию для (пускового) органа определения замыкания, т. к. это единственный способ достижения необходимой точности измерений на параллельных линиях.

Для дистанционной защиты компенсация применяется только в сложных случаях, когда другими способаами не удается обеспечить достаточные защищаемые зоны резервных ступеней.

Например, в случае, когда короткая линия следует за двухцепной.

По статистике компенсация от параллельной линии для дистанционных защит в прошлом применялась редко [3.42]. Причиной является то, что проверка функ-

ционирования защиты становилась более сложной из-за зависимости от различных ячеек питающей линии.

В цифровых реле компенсация может применяться более часто из-за встроенной функции определения замыкания.

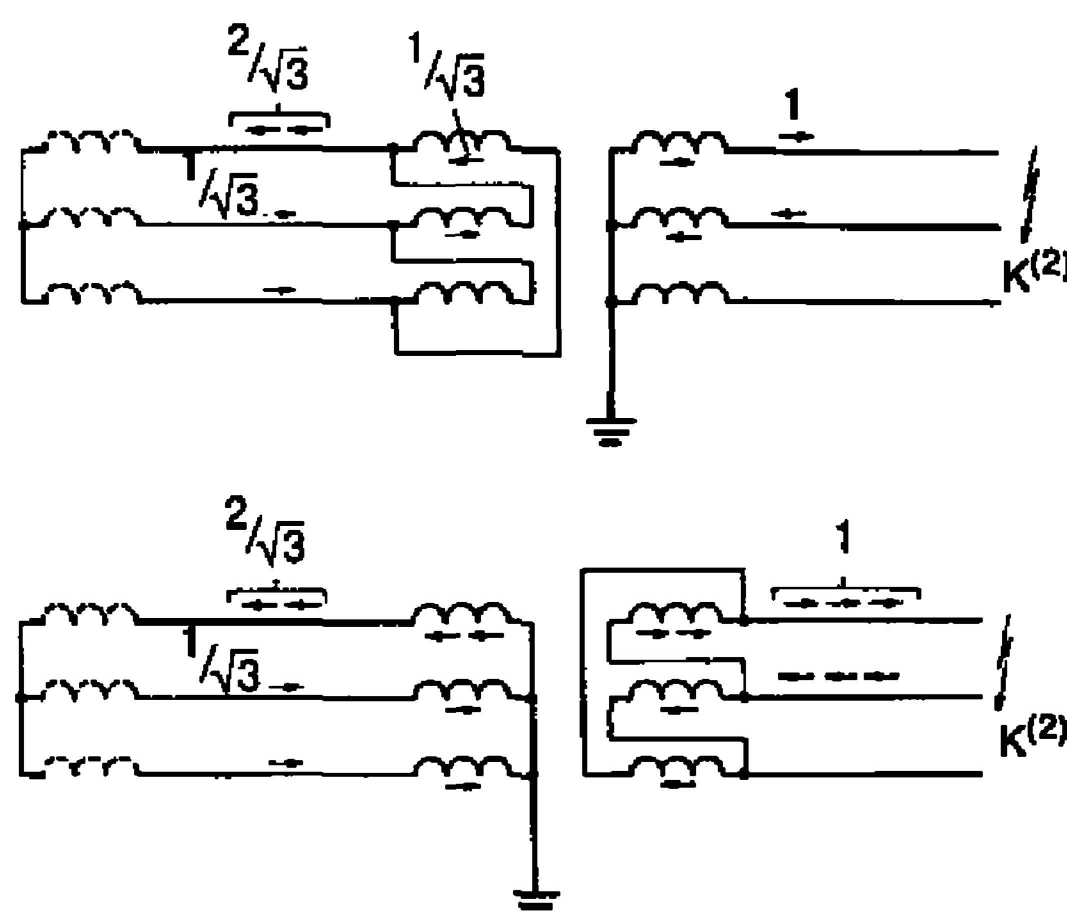
С помощью параметрирования реле можно выбрать режим использования компенсации, т. е. должна ли использоваться компенсация только для органа определения замыкания или для всей дистанционной защиты. В любой момент есть возможность выбора оптимального режима.

3.5.4. Дистанционная защита трансформатора

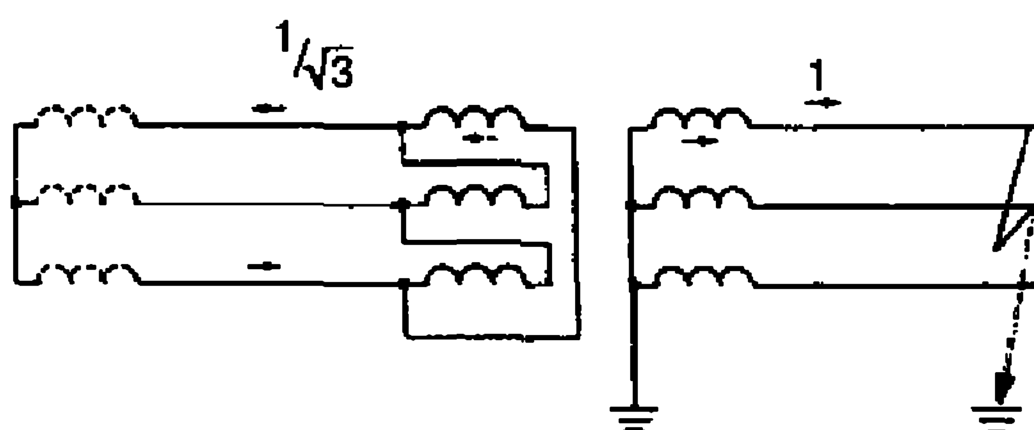
При выполнении дистанционных измерений в трансформаторах или за трансформаторами необходимо учесть некоторые следующие особенности.

- Полное сопротивление трансформируется (пересчитывается) с коэффициентом пропорциональности равным квадрату отношения числа витков в обмотках. Это соответствует квадрату коэффициента трансформации по напряжению.
- На трансформаторах с переключением ответвлений у обмоток коэффициент трансформации изменяется в соответствии с шагом переключателя.
- На векторных диаграммах трансформаторов с соединением обмоток Δ/Y составляющие прямой и обратной последовательности поворачиваются в разные стороны. Поэтому, изменяется распределение токов в фазах при переходе с одной обмотки трансформатора на другую. Двухфазное короткое замыкание на одной стороне проявляется как трёхфазное замыкание на другой стороне с несимметричным распределением токов (рис. 3.124, *а*). Составляющие нулевой последовательности не могут пройти через трансформатор Δ/Y. Поэтому, параметры замыканий на землю не могут быть измерены правильно дистанционной защитой, установленной на другой стороне трансформатора.

  Однофазное замыкание на землю на стороне звезды проявляется как двухфазное замыкание на стороне треугольника (рис. 3.124, *б*).
- Проведение измерений за автотрансформаторами и трансформаторами со



а) Трансформация токов при двухфазном коротком замыкании



б) Трансформация токов при однофазном коротком замыкании

Рис. 3.124. Трансформация токов замыканий трансформатором со схемой треугольник—звезда (при коэффициенте трансформации $n = 1$)

схемой соединения обмоток Y/Y и заземлением нейтральных точек с обеих сторон возможно.

Распределение трансформаторов тока и напряжения

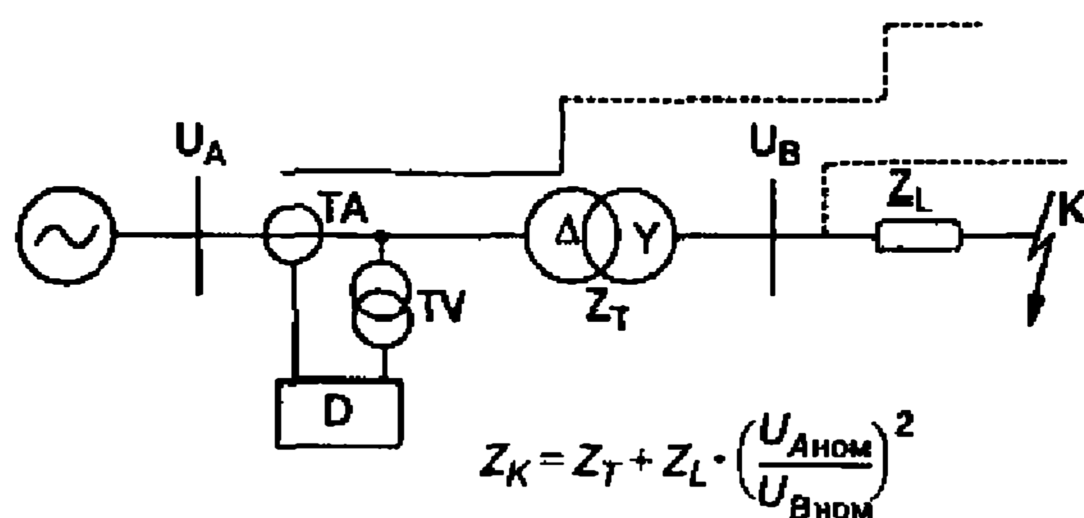
На рис. 3.125 представлены 4 возможные схемы подключения дистанционной защиты к измерительным трансформаторам. В большинстве случаев используются трансформаторы тока и напряжения, расположенные на одной и той же стороне силового трансформатора. Все остальные схемы являются специфичными.

Измерительные трансформаторы на стороне низшего напряжения (рис. 3.125, *а*)

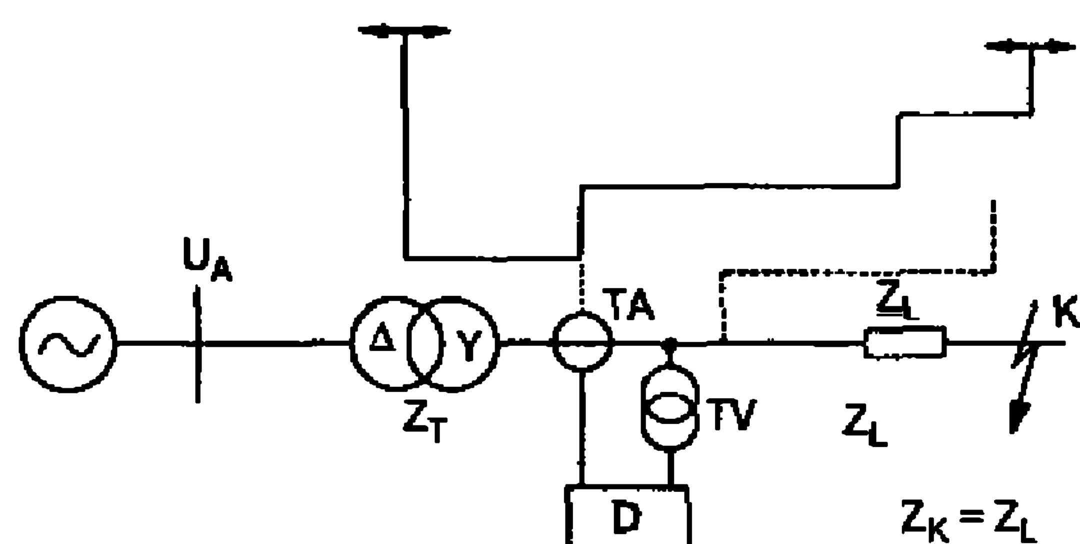
Эта схема используется, если нет возможности установить измерительные трансформаторы на стороне высшего напряжения, а защита отходящей линии должна быть обеспечена. Например, когда трансформатор и отходящая линия работают в блоке. В этом случае трансформатор и большая часть последующей линии должны быть защищены ступенью без выдержки времени.

Аналогичная схема используется для резервной защиты блока генератор—трансформатор. В этом случае дистанционная защита подключается к трансформаторам тока, установленным в фазах генератора, и к трансформаторам напряжения на выводах генератора.

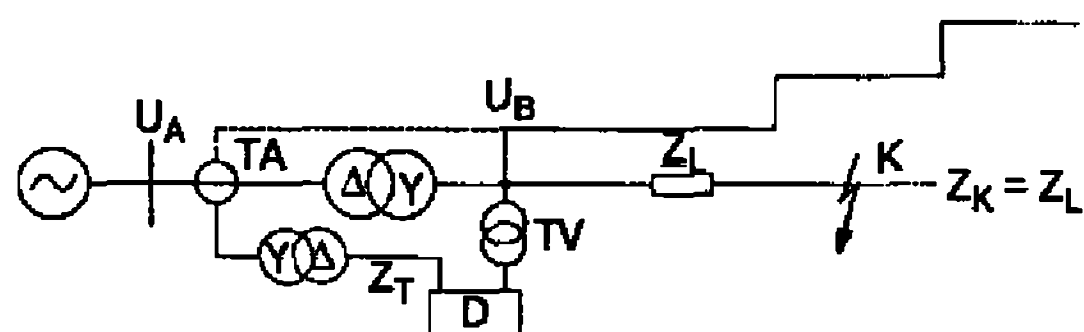
В общем случае, когда имеются шины высокого напряжения, выключатель и измерительные трансформаторы на стороне ВН, ступень с неполным охватом защищает 80—90 % трансформатора и только



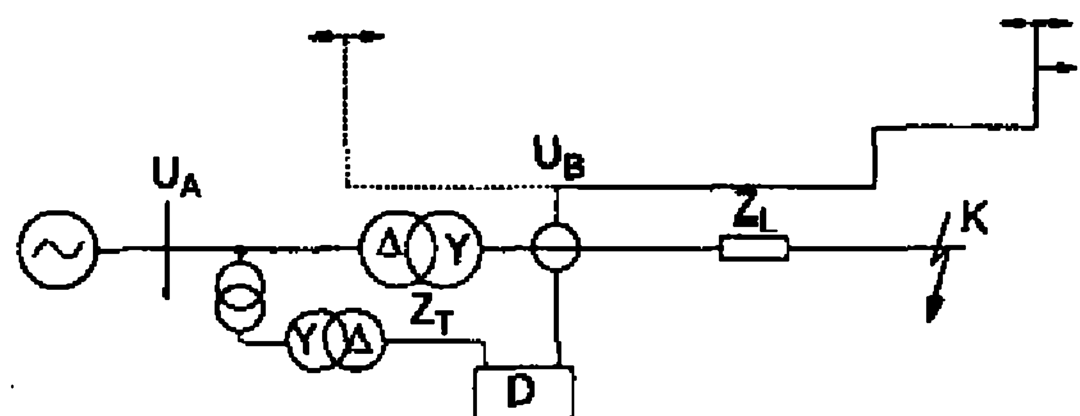
а) Трансформаторы тока и напряжения на стороне низкого напряжения



б) Трансформаторы тока и напряжения на стороне высокого напряжения



в) Трансформаторы тока на стороне низкого напряжения, трансформатор напряжения на стороне высокого напряжения



г) Трансформатор тока на стороне высокого напряжения, трансформатор напряжения на стороне низкого напряжения

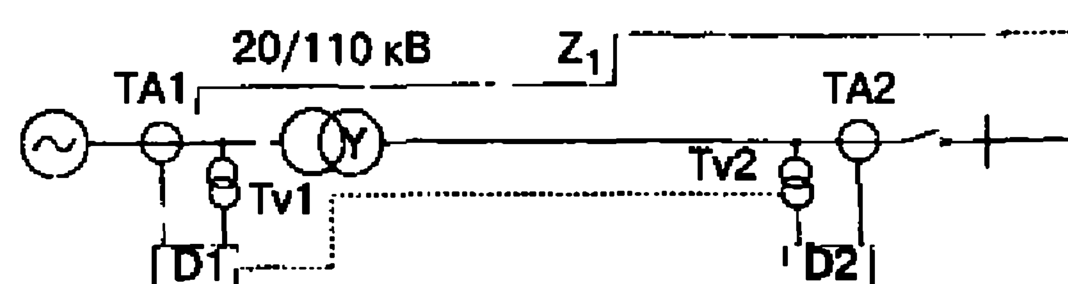
Рис. 3.125. Возможные схемы включения дистанционной защиты трансформаторов

зоны резервных ступеней защиты выходят за пределы трансформатора.

Защищаемые зоны ступеней на смежных линиях

Когда дистанционная защита устанавливается для работы при КЗ за трансформатором, необходимо учесть, что сопротивление короткого замыкания трансформатора может быть большим по сравнению с сопротивлением смежной линии. Это особенно важно, если мощность трансформатора небольшая, а смежная линия — короткая. В случае нормальной уставки в 90 % защита будет охватывать только очень маленькую часть смежной линии. На рис. 3.126 приведен численный пример, соответствующий этому случаю.

Изменение коэффициента трансформации на трансформаторах, которые имеют переключатели ответвлений, оказывает влияние на измерения. Более или менее точные измерения в этом случае становятся невозможными, т. к. полное сопротивление замыкания изменяется пропорционально квадрату $w_н/w_в$. Адаптация путем изменения коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов является слишком сложной задачей. Адаптация изменением установленных параметров срабатывания даже в цифровых реле может рассматриваться только теоретически.



Трансформаор:
$S_{ном}$ = 60 МВА
$U_к$ = 12 %

Линия:
110 кВ, 10 км,
X'_L = 0,35 Ом/км

Сопротивления, приведенные к стороне 20 кВ:

$$X_T = 0{,}12 \cdot \frac{20^2}{60} = 0{,}8 \text{ Ом}$$

$$X_L = 10 \cdot 0{,}35 \cdot \left(\frac{20}{110}\right)^2 = 0{,}116 \text{ Ом}$$

уставка D1 первой ступени:

$$X_1 = (X_T + X_L) \cdot 0{,}9 = 0{,}824 \text{ Ом}$$

защищаемая часть линии:

$$Z_1\% = \frac{X_1 - X_T}{X_L} \cdot 100\,\% = 21\,\%$$

Рис. 3.126. Дистанционная защита блока трансформатор—линия

Ступенчатые дистанционные защиты на трансформаторах Δ/Y

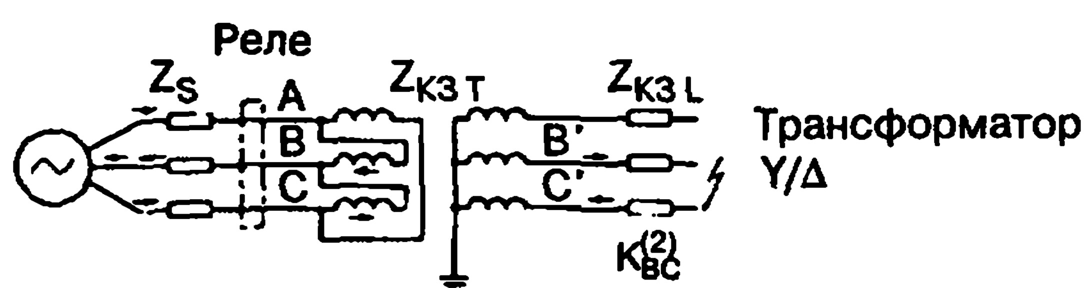
В случае трансформаторов со схемой соединения Δ/Y для дистанционных измерений и для определения направления требуются подробные исследования.

Дистанционные измерения

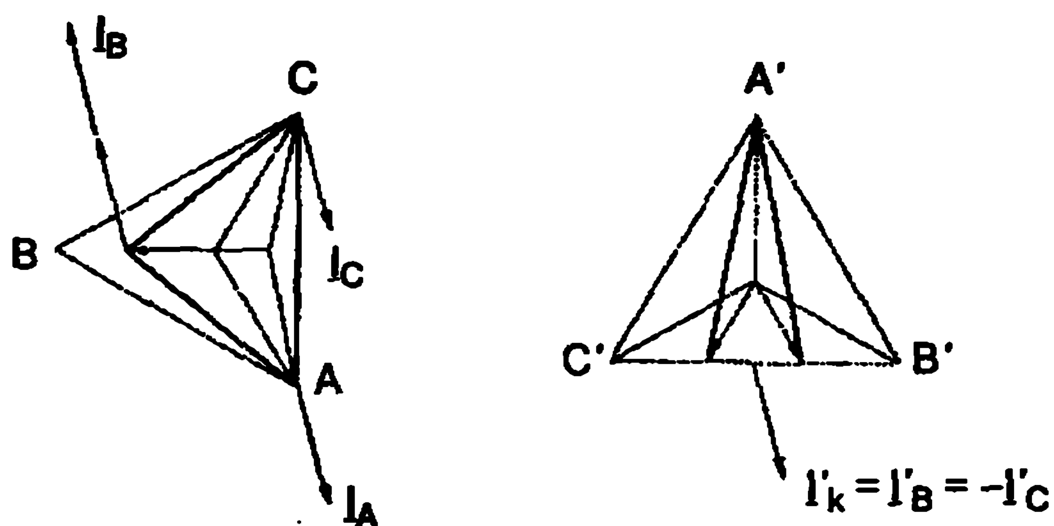
Правильные дистанционные измерения при повреждениях за трансформатором возможны только в случае междуфазных замыканий. В случае замыканий на землю зона охвата чрезвычайно мала. При проведении измерений в системах с изолированной или компенсированной нейтралью такой проблемы не существует, т. к. однофазные короткие замыкания просто не возникают. В системах с заземленной нейтралью может потребоваться отдельная защита от замыканий на землю.

Распределение токов и напряжений в трансформаторах с соединением обмоток Δ/Y, в случае возникновения КЗ на стороне звезды, представлено на рис. 3.127 и 3.128. Предполагается, что защита установлена на сторое обмоток, соединенных в Δ.

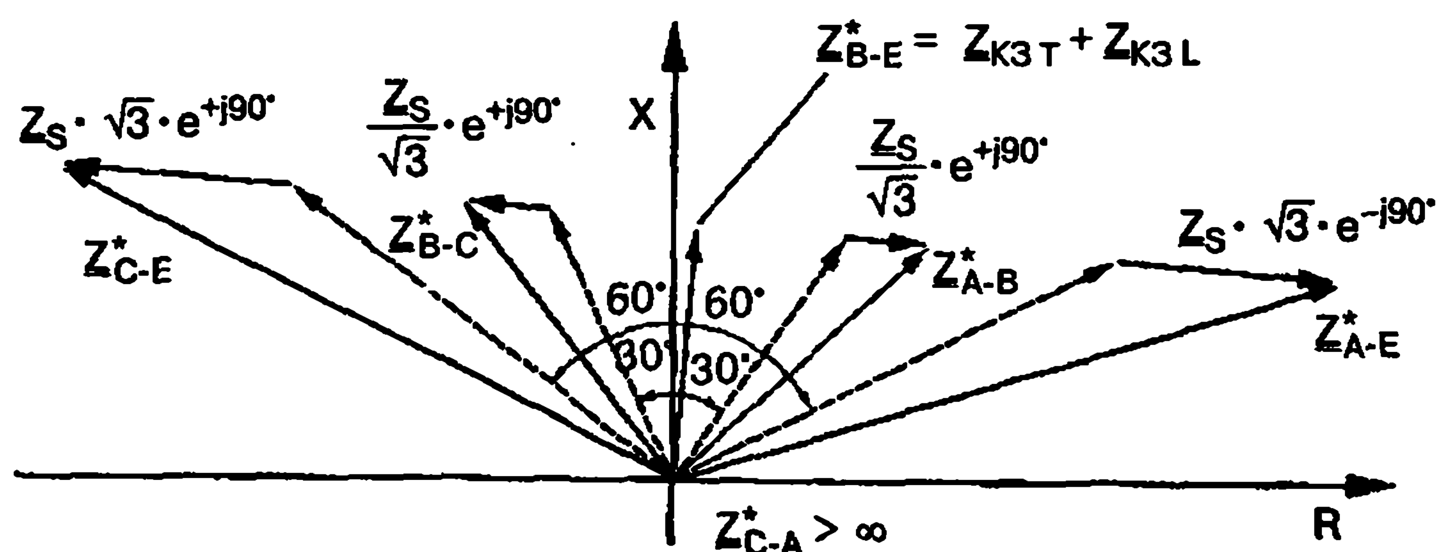
В общем случае диаграмма на рис. 109 справедлива и при междуфазных замыканиях на стороне Δ, когда защита подсоединена к обмоткам со стороны Y силового трансформатора. В этом случае необходимо только изменить обозначения фаз.



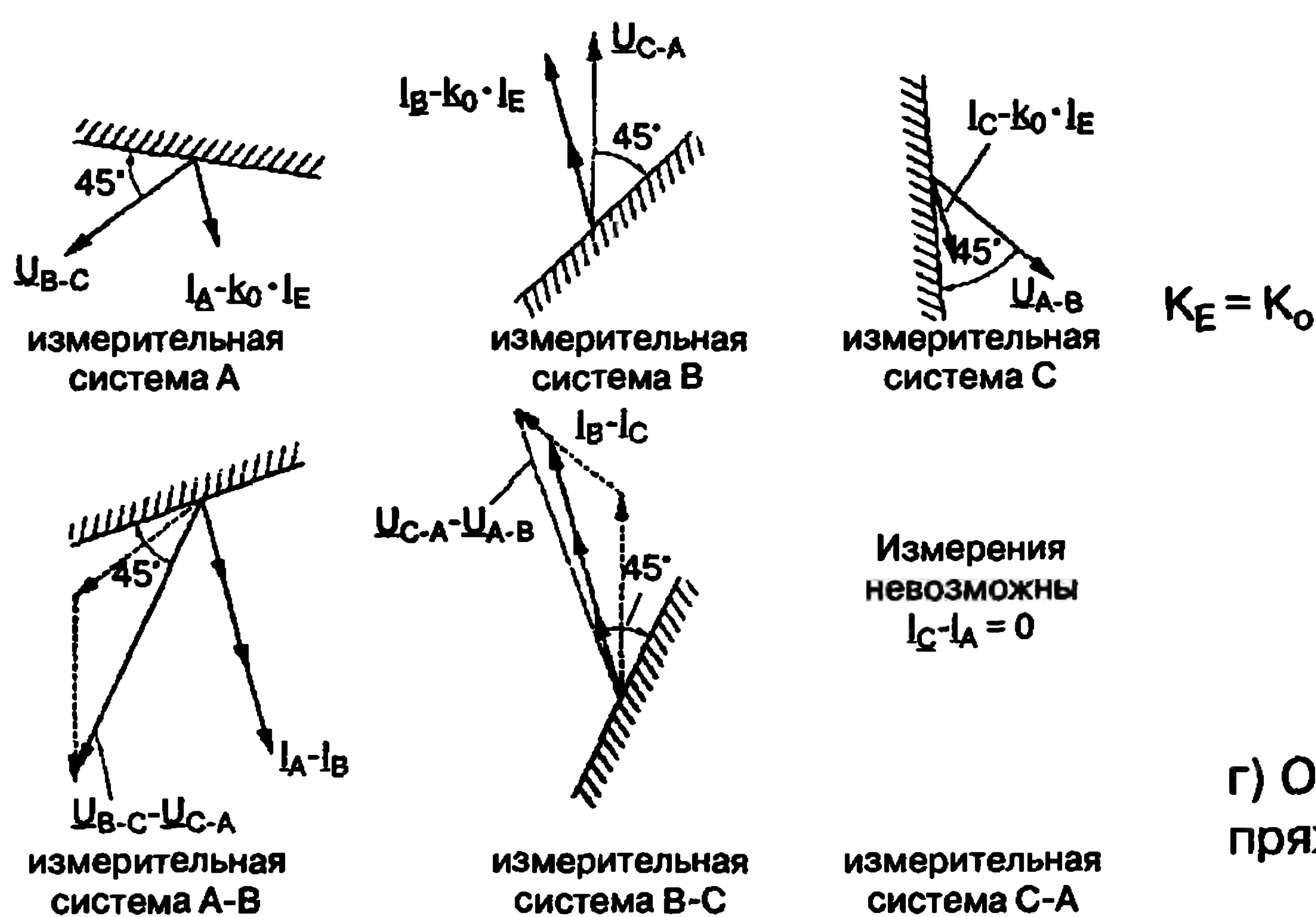
а) Эквивалентная схема



б) Диаграммы токов и напряжений

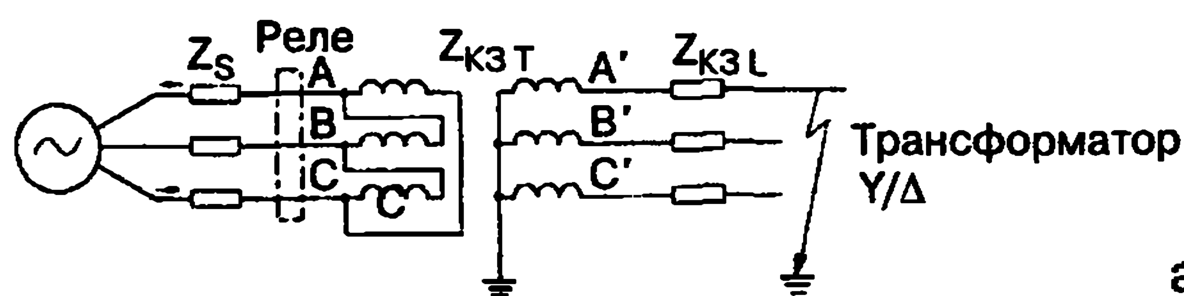


в) Измеряемые сопротивления

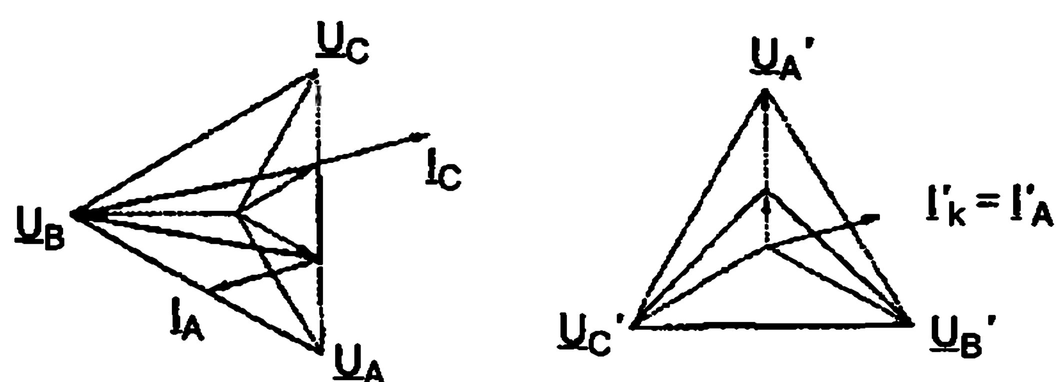


г) Определение направления по напряжению неповрежденных фаз

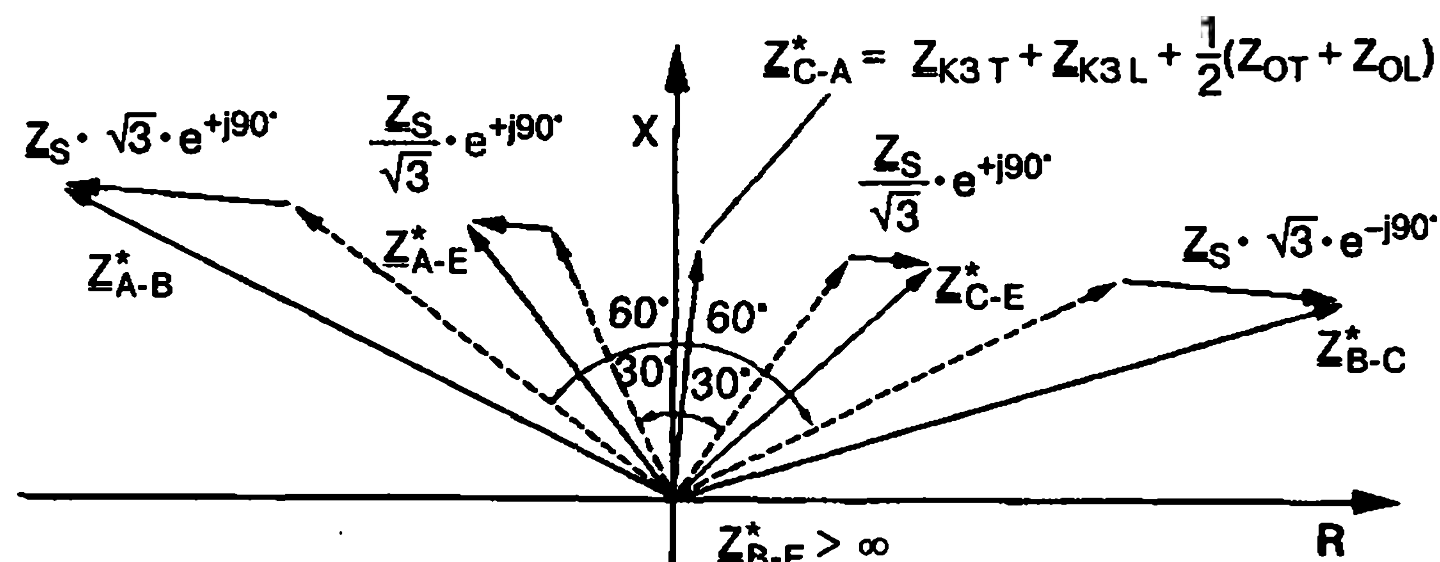
Рис. 3.127. Дистанционные измерения при двухфазных КЗ на стороне Y трансформатора; защита установлена на стороне треугольника



а) Эквивалентная схема



б) Диаграммы токов и напряжений



в) Измеряемые сопротивления



г) Определение направления по напряжению неповрежденных фаз

Рис. 3.128. Дистанционные измерения при КЗ за трансформатором Δ/Y

Сопротивления при двухфазных КЗ измеряются дистанционной защитой правильно (измерения производятся в контуре фаза—земля, В-Е в данном примере). В общем случае измерительным является контур, где протекает двойной ток.

Необходимо заметить, что при использовании четырёхугольных характеристик, реактивные сопротивления замыкания всех других контуров также измеряются практически правильно, особенно, если принять, что для трансформатора угол короткого замыкания равен 90°, как представлено на рис. 3.127. Дистанционные измерения в двух контурах «фаза—фаза» (в нашем случае А-В и В-С) в любом случае зафиксируют повреждение, если граница зоны ступени в направлении R больше, чем $\frac{1}{2} \cdot \underline{Z}_{K3} + \frac{Z_S}{\sqrt{3}}$.[1]

В реле 7SA6 и 7SA522 будет выбран контур «фаза—земля» с правильным значением полного сопротивления замыкания при использовании пуска по сопротивлению. Причиной тому является интегрированная функция сравнения полных сопротивлений, которая в любом случае может определить наименьшее из сопротивлений. В случае использования комбинированного пуска ($U <$, $I >$) измеряются параметры только междуфазных контуров, т. к. критерии ($U_E >$, $I_E >$) не используются. Только в особых случаях, когда происходит однофазный пуск по повышению тока в фазе с двойным током короткого замыкания, может быть выбран контур «фаза—земля» с верным значением сопротивления. Параметр 1630A в реле 7SA6 должен быть дополнительно настроен на измерение фаза-земля («I_E — разрешить» в традиционных реле).

В случае однофазного короткого замыкания на стороне звезды, из-за перераспределения токов, на стороне треугольника появляются токи в двух фазах (рис. 3.128).

Соответственно, междуфазный контур обладает наименьшим полным сопротивлением. Полные сопротивления других контуров снова располагаются на линии, перпендикулярной этой, т.е. реактивные сопротивления, измеряемые во всех остальных контурах равны.

В этом случае, полное сопротивление представляется удаленным на величину $0{,}5(\underline{Z}_{0T} + \underline{Z}_{0L})$.

Это объясняется тем, что составляющие нулевой последовательности не проходят через трансформатор со схемой соединения Δ/Y.

Поэтому защищаемая зона значительно сокращается.

Если на стороне высокого напряжения имеется разветвленная сеть, то в схеме замещения нулевой последовательности необходимо учитывать сопротивления не только заземленных трансформаторов, но и других элементов сети.

На практике, необходимо учитывать сокращение зоны охвата при возникновении замыканий на землю.

Определение направления.

При определении направления по напряжениям повреждённых фаз, в любом случае получается правильный результат для петли с точным определением сопротивления. В исключительном случае, в других контурах может быть зафиксировано замыкание в обратном направлении. Как показано на рис. 3.127, *в* и 3.128, *в* сопротивление петли, занимающее крайнее

[1] Строго говоря, при расчете необходимо учитывать сопротивление источника обратной последовательности $\underline{Z}_{S2}$. Но для системы, достаточно удалённой от генератора, можно считать, что $\underline{Z}_{S2}$ приблизительно равно $\underline{Z}_{S1}$ (сопротивление источника прямой последовательности).

левое положение во втором квадранте плоскости $\underline{Z}$ не попадает в область прямого направления, которая ограничена характеристикой направленности с наклоном 45°.

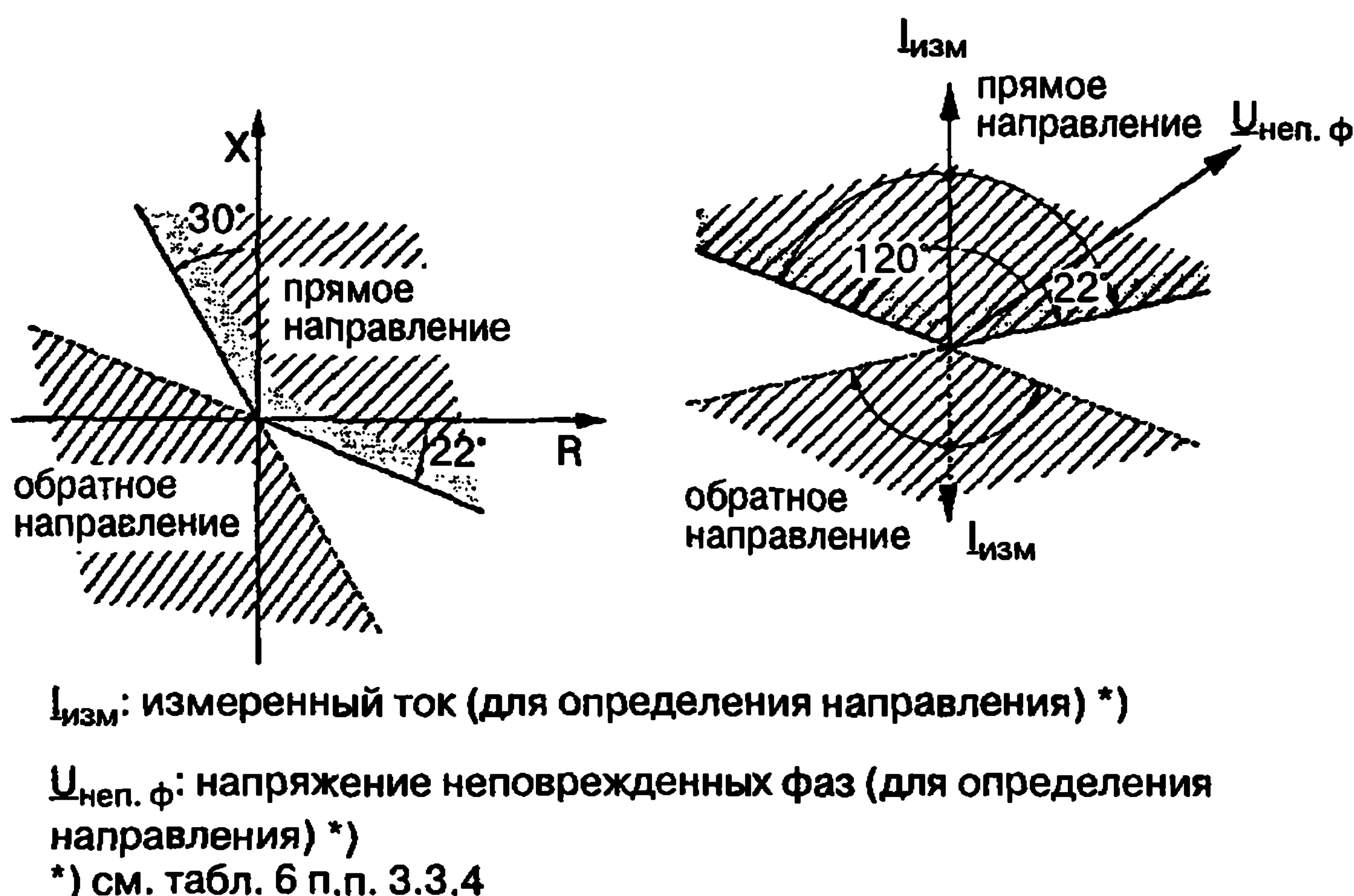
Если используются напряжения неповреждённых контуров, то возникают условия, представленные на рис. 3.127, *г* и 3.128, *г*. Принцип измерений и выбора напряжений неповрежденных контуров описан в п.п. 3.3. В рассмотренных примерах использовалась 45° характеристика реле. Для построения этих диаграмм можно пользоваться простым правилом: характеристика направленности должна отставать от напряжения выбранной неповреждённой фазы на угол 45°.

Представленное на рисунках распределение токов и напряжений показывает, что все измерительные системы определяют замыкание в правильном направлении. Наихудшим является случай, когда напряжение снижается не сильно (удалённое короткое замыкание), а ток является практически чисто индуктивным (большой угол короткого замыкания), т. к. при этом некоторые измерительные системы могут неправильно определить направление КЗ. Это относится к тем приведенныv на рисунках измерительным системам, где ток уже находится вблизи границы характеристики направленности.

При использовании комбинированного пуска обычно измеряются междуфазные петли. Пусковые органы А-В и В-С будут срабатывать в случае КЗ по рис. 3.127. Существует определенная вероятность, что будет выбран лучший контур В-Е, но только, когда пусковой орган В срабатывает один при условиях, оговоренных выше для измерения расстояния. В случае повреждения по рис. 3.128 междуфазный пусковой орган будет срабатывать правильно подобно пусковому органу сопротивления.

В любом случае следует выбирать пуск по сопротивлению, потому что он выбирает правильный контур повреждения (с самым низким сопротивлением), что гарантирует правильный выбор направления.

Наконец, следует упомянуть, что действительная характеристика современных цифровых реле — изогнутая и определяет пределы каждой области срабатывания как в прямом, так и в обратном направлении (рис. 3.129). Это обеспечивает допол-



$\underline{I}_{изм}$: измеренный ток (для определения направления) *)

$\underline{U}_{неп. ф}$: напряжение неповрежденных фаз (для определения направления) *)

*) см. табл. 6 п.п. 3.3.4

Рис. 3.129. Характеристика направленности цифровой дистанционной защиты (7SA6)

нительную надежность определения направления.

Выводы.

Использование ступеней дистанционной защиты для трансформаторов Δ/Y может быть рекомендовано только при использовании цифровых реле 7SA6 и 7SA522, обеспечивающих во всех случаях правильное определение направления. Однако, необходимо учитывать, что при дистанционных измерениях в случае возникновения замыканий на землю, зона охвата всегда сужается.

Односистемные дистанционные защиты, например 7SA511, имеют ограниченную область применения из-за необходимости выбора только одного контура для измерений. При двухфазных замыканиях трехфазный токовый пуск может вызвать нежелательный выбор контура, что может привести к отказу ступеней дистанционной защиты или к неверному отключению направленной ступенью с выдержкой времени.

Измерительные трансформаторы на стороне высшего напряжения (рис. 3,125, *б*)

В этом случае, при всех видах замыканий на линии определяется правильное значение полного сопротивления.

Зоны действия защиты на станции с отходящими линиями должны быть согласованы с зонами ступеней защиты на этих отходящих линиях. Это обеспечивает резервную защиту шин и отходящих линий.

Дополнительно одна из ступеней без выдержки времени может быть направлена в другую сторону, для защиты трансформатора.

Трансформатор тока на стороне низкого напряжения, трансформатор напряжения на стороне высокого напряжения (рис. 3.125, *в*).

Преимуществом этой схемы подключения, относительно представленной на рис. 3.125, *а*, является то, что при повреждениях на линии измеряется только полное сопротивление линии, сопротивление трансформатора исключается. Это особенно важно для кабелей и коротких линий. При определении уставок защиты необходимо учитывать коэффициент трансформации трансформатора. При использовании трансформаторов с соединением обмоток Δ/Y вектор тока с помощью промежуточных трансформаторов тока должен быть повёрнут на определённый угол, зависящий от группы соединения обмоток силового трансформатора. Альтернативно, вторичные обмотки основных ТТ (рис. 3.125, *в*) могут быть соединены по схеме Δ. Схема соединения обмоток промежуточных ТТ для коррекции группы соединения представлена на рис. 3.130.

Векторная группа промежуточного трансформатора тока должна быть выбрана так, чтобы происходил поворот векторов в сторону, противоположную повороту, вызванному силовым трансформатором. Наиболее простым способом для проверки компенсации является «метод векторов», который обычно используется, например, для дифференциальной защиты трансформатора.

При преобразовании векторов необходимо учитывать то, что при коэффициенте трансформации трансформатора, равном 1, токи на сторонах треугольника и звезды связаны соотношением $I_\Delta = I_Y \cdot \sqrt{3}$. Это обусловлено законом электромагнитной индукции ($U_1/w_1 = U_2/w_2$) и законом потокосцепления ($I_1 w_1 = I_2 w_2$).

Ток однофазного замыкания на землю на стороне Y не может быть измерен таким способом, т. к. токи нулевой последовательности замыкаются в обмотке, соединённой в треугольник. Однако он может быть измерен с помощью реле, подклю-

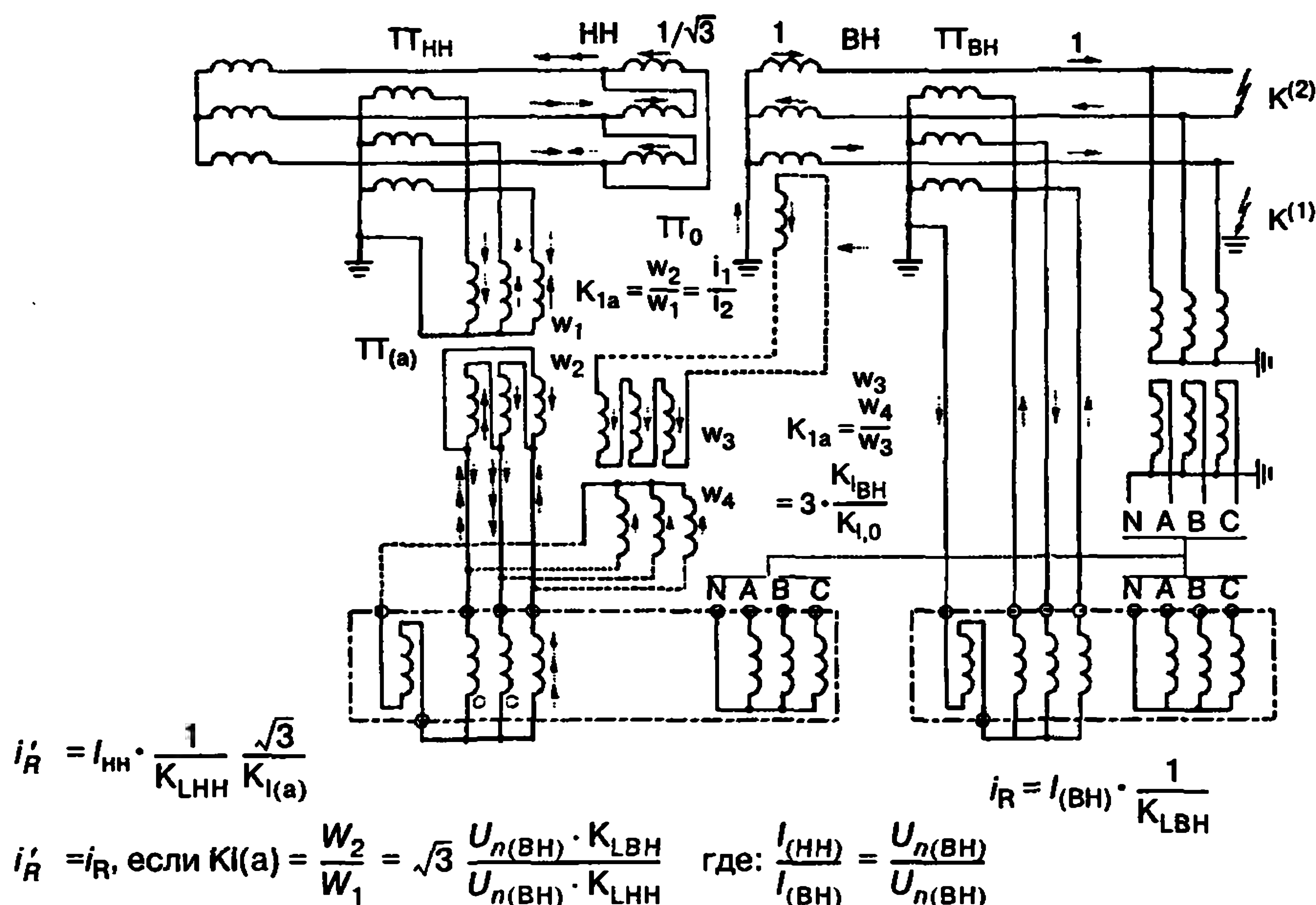


Рис. 3.130. Схема подключения промежуточных трансформаторов тока и напряжения для точного измерения сопротивления

ченного к ТТ, установленному в нейтрали трансформатора.

При этом замыкания на землю в системе с заземлённой нейтралью могут быть правильно оценены дистанционной защитой.

Сам трансформатор находится внутри зоны защиты первой ступени, но с некоторыми ограничениями. При замыканиях в трансформаторе реле измеряет ток, поступающий от источника со стороны низкого напряжения, тогда как напряжение соответствует (обусловлено) падению напряжения от тока КЗ в индуктивном сопротивлении трансформатора на стороне высокого напряжения.

Падение напряжения относительно велико, если КЗ происходит вблизи выводов обмотки низшего напряжения трансформатора, а со стороны высокого напряжения протекает большой ток короткого замыкания ($\underline{U}_{КЗ} = \underline{I}_{КЗв} \cdot \underline{Z}_T$). Тогда измеряемое полное сопротивление ($\underline{Z}_{КЗ} = \underline{U}_{КЗ}/\underline{I}_{КЗА}$) становится больше полного сопротивления короткого замыкания трансформатора, если $\underline{I}_{КЗА} < \underline{I}_{КЗв}$.

Если зона, защищаемая первой ступенью, охватывает лишь небольшую часть линии за трансформатором (если линия короткая), то может случиться так, что измеренное сопротивление окажется вне зоны защиты.

Таки образом, эта схема не позволяет обеспечить 100 % защиту трансформатора.

Трансформаторы напряжения на стороне низшего напряжения, трансформаторы тока на стороне высшего напряжения (рис. 3.125, *г*)

Перед рассмотрением этой схемы необходимо указать следующие основные правила для дистанционных защит.

- Место установки ТТ соответствует началу координат характеристики определения направления.
- Дистанционные измерения всегда зависят от места установки трансформатора напряжения.

В этом случае замыкания в трансформаторе рассматриваются как находящиеся в обратном направлении, при этом измеряемое сопротивление должно определяться также, как и в предыдущем случае. При замыканиях на линии измеряется сопротивление короткого замыкания трансформатора. На трансформаторах со схемой соединения Δ/Y, для компенсации группы соединения требуется промежуточный трансформатор напряжения. Тем не менее, измерить расстояние до места повреждения при замыканиях на землю невозможно, т. к. напряжение нулевой последовательности не трансформируется.

3.5.5. Несимметрия линии

Полное сопротивление линии определяется материалом, сечением проводников и конструкцией опор, т. е. способом подвешивания проводов. На сопротивление нулевой последовательности также оказывает влияние характеристика грунта. Соединение проводников на опорах вызывает естественную несимметрию.

Линии длиной более 40 км обычно транспонируются для предотвращения протекания больших токов обратной и нулевой последовательности. По экономическим соображениям короткие линии не транспонируются. Вместо этого компенсировать разницу пытаются различным размещением проводников на последовательно-соединённых линиях.

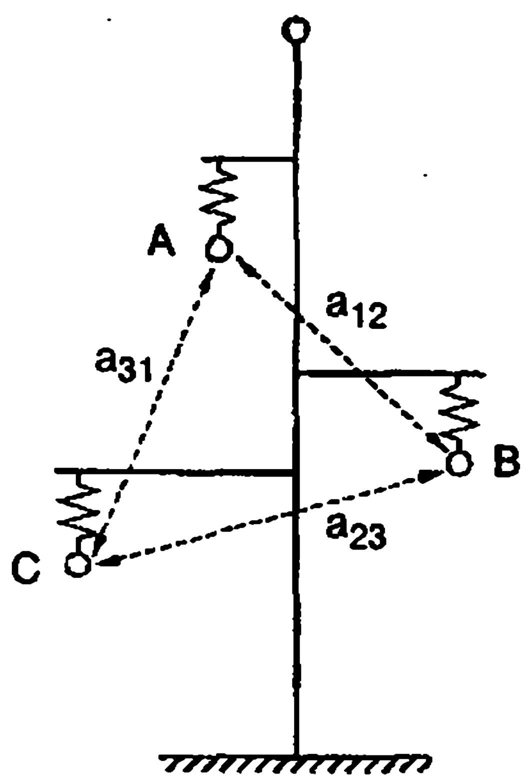


Рис. 3.131. Конфигурация опоры для одноцепной линии

В этом п.п. рассмотрено влияние такой несимметрии на точность измерений дистанционной защиты и приведены рекомендации по выбору уставок.

Транспонированные линии

При определении параметров линии (R_1', X_2' и R_0', X_0') обычно подразумевается транспонированная линия. Значения этих сопротивлений соответствуют удельным сопротивлениям прямой и нулевой последовательности симметричной линии. Это означает, что между симметричными компонентами линии отсутствует связь.

Для расчёта реактивного сопротивления линии определяется среднее геометрическое расстояние между проводами фаз (рис. 3.131):

$$A = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}} \text{ (м)}. \qquad (3.131)$$

Полное сопротивление линии рассчитывается следующим образом:

Сопротивление прямой последовательности:

$$Z_1' = R_L' + j\omega \cdot 10^{-4}\left(2 \cdot \ln\frac{A}{r} + 0{,}5\mu_1\right) \text{ (Ом/км)}$$

на один проводник. (3.132)

Сопротивление нулевой последовательности (воздушная линия без заземленного троса):

$$Z_0' = R_L' + 3 \cdot R_E' + j\omega \cdot 10^{-4}\left(6 \cdot \ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r \cdot A^2}} + 0{,}5\mu_1\right) \text{ (Ом/км)}; \qquad (3.133)$$

$\delta = 1650\sqrt{\frac{\rho}{\omega}}$ (м) — эквивалентная глубина возврата тока через землю; (3.134)

$R'_E = \frac{\pi}{2} \cdot \omega \cdot 10^{-4}$ (Ом/км) — сопротивление земли; (3.135)

a_{12}, a_{23}, a_{31} — расстояние между проводниками (м);

A — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз в (м);

r — радиус сечения проводника в (м);

R'_L — активное сопротивление проводника (кабеля) (Ом/км);

R'_E — активное сопротивление земли (Ом/км);

δ — эквивалентная глубина возврата тока через землю (м);

ρ — удельное сопротивление земли (Ом · м):
100 Ом · м для влажной земли;
500 Ом · м для сухой земли;

μ_1 — относительная проницаемость (для Cu и Al $\mu_1 = 1$);

ω — круговая частота ($2\pi f$) (1/сек).

При измерении сопротивления решающее значение имеют сопротивления петли, рассчитываемые следующим образом.*

Двухфазное короткое замыкание:

$$Z'_{L(\text{ф-ф})} = 2 \cdot Z'_1 = 2 \cdot R'_L + $$
$$+ j2 \cdot \omega \cdot 10^{-4}\left(2 \cdot \ln\frac{A}{r} + 0{,}5\mu_1\right). \quad (3.136)$$

Замыкание на землю:

$$Z'_{L(\text{ф-}E)} = Z'_1 + Z'_E = Z'_1 + \frac{Z'_0 - Z'_1}{3} =$$
$$= R'_L + R'_E +$$
$$+ j \cdot \omega \cdot 10^{-}\left(2 \cdot \ln\frac{\delta}{r} + 0{,}5\mu_1\right). \quad (3.137)$$

* При делении $Z'_{L(\text{ф-ф})}$ на 2 или $Z'_{L(\text{ф-}E)}$ на $1 + (Z_E/Z_L)$ результатом всегда является сопротивление прямой последовательности Z'_1.

Из выражения (3.136) видно, что реактивное сопротивление контура при междуфазном замыкании сильно зависит от отношения расстояния между проводами к диаметру провода, что может быть точно подсчитано по известным параметрам опоры.

Из выражения (3.137) видно, что реактивное сопротивление контура замыкания на землю зависит от отношения глубины возврата тока через землю δ к радиусу проводника r. Значение δ сильно зависит от характеристик земли (проводимости ρ). Это вносит неопределенность в расчёты сопротивления замыкания на землю, которое, в результате, может быть определено только путем измерений в соответствующем регионе.

Нетранспонированные линии.

Из-за несимметрии геометрического расположения проводов на опоре расстояния между фазными проводниками не равны и поэтому сопротивления взаимоиндукции между проводниками не равны.

Сначала рассмотрим линию без заземленного проводника (троса). На рис. 3.132 представлена эквивалентная схема замещения части линии длиной 1 км.

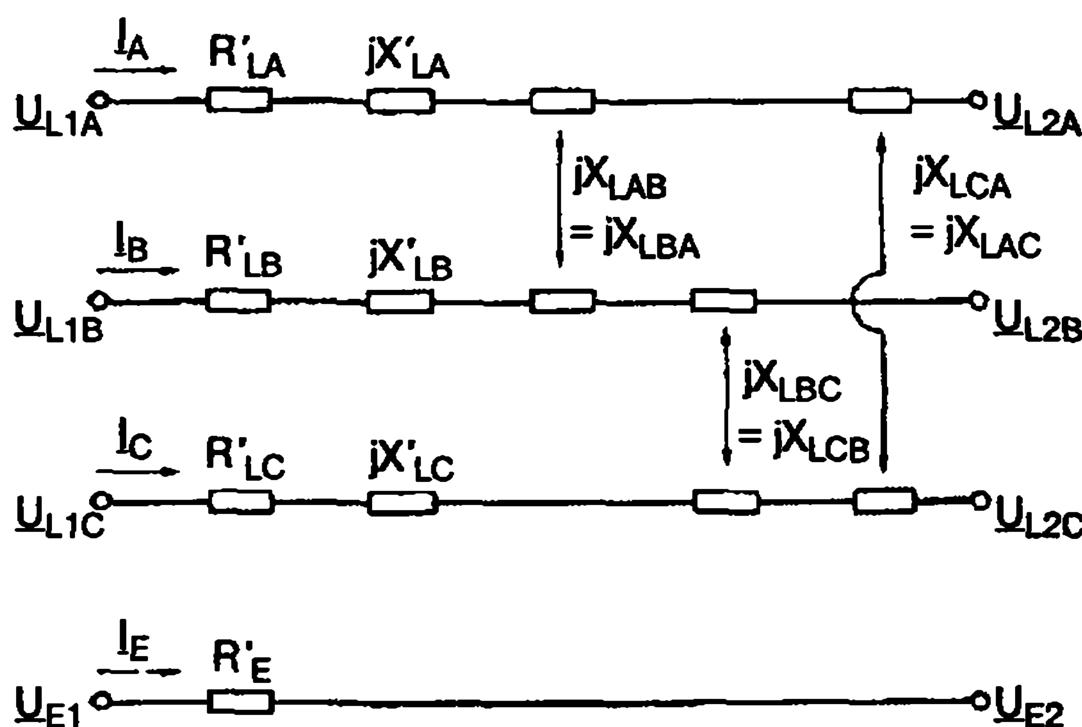


Рис. 3.132. Эквивалентная схема замещения секции одноцепной воздушной линии без заземляющего проводника

Значения X_L в этом случае соответствуют собственным реактивным сопротивлениям проводов в схеме, где обратным проводом служит земля с сопротивлением R_E.

Сопротивления взаимоиндукции X_{Lmn} определяются для всех контуров с общим обратным проводом.

Для падения напряжения в каждой фазе можно получить следующие выражения:

$$\Delta\underline{U}_{LA} = \underline{U}_{L1A} - \underline{U}_{L2A} = (R'_{LA} + jX'_{LA}) \cdot \underline{I}_A + \\ + jX'_{LAB} \cdot \underline{I}_B + jX'_{LAC} \cdot \underline{I}_C; \quad (3.138)$$

$$\Delta\underline{U}_{LB} = \underline{U}_{L1B} - \underline{U}_{L2B} = (R'_{LB} + jX'_{LB}) \cdot \underline{I}_B + \\ + jX'_{LBA} \cdot \underline{I}_A + jX'_{LBC} \cdot \underline{I}_C; \quad (3.139)$$

$$\Delta\underline{U}_{LC} = \underline{U}_{L1C} - \underline{U}_{L2C} = (R'_{LC} + jX'_{LC}) \cdot \underline{I}_C + \\ + jX'_{LCB} \cdot \underline{I}_B + jX'_{LCA} \cdot \underline{I}_A; \quad (3.140)$$

$$\Delta\underline{U}_E = R'_E \cdot \underline{I}_E. \quad (3.141)$$

Если проводники всех трёх фаз одинаковы, то:

$$R'_{LA} = R'_{LB} = R'_{LC} = R'_L;$$

$$X'_{LA} = X'_{LB} = X'_{LC} = X'_L$$

и в результате:

$$\Delta\underline{U}_{LA} = (R'_L + jX'_L) \cdot \underline{I}_A + jX'_{LAB} \cdot \underline{I}_B + \\ + jX'_{LAC} \cdot \underline{I}_C + R'_E \cdot \underline{I}_E; \quad (3.142)$$

$$\Delta\underline{U}_{LB} = (R'_L + jX'_L) \cdot \underline{I}_B + jX'_{LBA} \cdot \underline{I}_A + \\ + jX'_{LBC} \cdot \underline{I}_C + R'_E \cdot \underline{I}_E; \quad (3.143)$$

$$\Delta\underline{U}_{LC} = (R'_L + jX'_L) \cdot \underline{I}_C + jX'_{LCB} \cdot \underline{I}_B + \\ + jX'_{LCA} \cdot \underline{I}_A + R'_E \cdot \underline{I}_E; \quad (3.144)$$

$$\Delta\underline{U}_E = R'_E \cdot \underline{I}_E. \quad (3.145)$$

При этом реактивные сопротивления рассчитываются следующим образом:

$$X'_L = j\omega \cdot 10^{-4}\left(2 \cdot \ln\frac{\delta}{r} + 0{,}5\mu_1\right) \text{ —} \quad (3.146)$$

(собственно реактивное сопротивление однопроводной линии «провод—земля»).

$$X'_{L12} = j\omega \cdot 10^{-4}\left(2 \cdot \ln\frac{\delta}{a_{12}}\right) \text{ —} \quad (3.147)$$

(реактивное сопротивление обусловленное взаимоиндукцией между двумя параллельными линиями «провод—земля», т. е. между фазами).

Таким образом, можно рассчитать полные сопротивления для каждого контура замыкания. Предполагается, что линия не нагружена, питание производится только с одной стороны, отсутствуют токи в неповрежденных фазах. Это справедливо и для случая, когда ток КЗ существенно превышает ток нагрузки.

Двухфазное короткое замыкание $K^{(2)}_{AB}$.

В этом случае справедливо следующие соотношения:

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_B = \underline{I}_{К3}; \underline{I}_C = 0; \underline{I}_E = 0.$$

Отсюда получаем:

$$Z'_{A\text{-}B} = \frac{\Delta\underline{U}_{LA} - \Delta\underline{U}_{LB}}{\underline{I}_{К3}} = 2 \cdot R'_L + \\ + j2 \cdot (X'_L - X'_{LAB}). \quad (3.148)$$

Подставляя выражения (3.146) и (3.147), получаем:

$$Z'_{A\text{-}B} = 2 \cdot R'_L + j2 \cdot \omega \times \\ \times 10^{-4}\left(2 \cdot \ln\frac{a_{12}}{r} + 0{,}5\mu_1\right). \quad (3.149)$$

Для других двухфазных замыканий используются расстояния a_{23}, a_{31} соответственно.

<u>Однофазное замыкание на землю</u> $K_A^{(1)}$.

В этом случае справедливо следующее:

$\underline{I}_A = -\underline{I}_E = \underline{I}_{КЗ}; \underline{I}_C = \underline{I}_B = 0.$

Отсюда получаем:

$$Z'_{A\text{-}E} = \frac{\Delta\underline{U}_{LA} - \Delta\underline{U}_E}{\underline{I}_{КЗ}} = R'_L + R'_E + jX'_L. \quad (3.150)$$

Подставляя выражение (129), получаем:

$$Z'_{A\text{-}E} = R'_L + R'_E + j\omega \times 10^{-4}\left(2\cdot\ln\frac{\delta}{r} + 0{,}5\mu_1\right). \quad (3.151)$$

Из выражения (3.149) видно, что расстояние между фазными проводами в повреждённой линии в значительной степени определяет реактивное сопротивление контура. Наименьшее расстояние между проводниками определяет наименьшее реактивное сопротивление и, следовательно, наибольшую зону охвата. Поэтому уставка ступени с неполным охватом защищаемой зоны должна быть определена с учётом этого контура. Наименьшая защищаемая зона определяется контуром, где расстояние между проводниками наибольшее. Соответственно, при выборе уставки ступени с излишним охватом необходимо учитывать именно этот контур.

На линиях без заземленных тросов для всех трёх возможных контуров замыкания фазы на землю измеряется одинаковое полное сопротивление, что видно из выражения (3.151). Разницей в высоте подвеса фазных проводников относительно земли можно пренебречь, т. к. глубина залегания эквивалентного обратного провода (т. е. глубина возврата тока δ) равна приблизительно 1 км (931 м при сопротивлении грунта ρ = 100 Ом · м)

Рассматриваемый ниже пример поясняет влияние несимметрии.

<u>Пример.</u>

Одноцепная воздушная линия 110 кВ.

Конструкция опоры изображена на рис. 3.133.

Провода: 185/32 мм² Al/St.

Радиус провода: 0,95 см = $9{,}5\cdot10^{-3}$ м.

R_L = 0,157 Ом/км.

Сопротивление грунта: ρ = 100 Ом · м.

Рассчитываем сопротивление контуров.

<u>Транспонированная линия:</u>

По (3.136)

$$\underline{Z}'_{K(\text{ф-ф})} = 2\cdot\underline{Z}'_1 = 0{,}314 + j0{,}803 \text{ Ом/км}.$$

<u>Нетранспонированная линия</u>

В соотвествии с (3.149),

$Z'_{K(A\text{-}B)} = 0{,}314 + j0{,}774$ Ом/км,

($\Delta X = -3{,}6$ %),

$Z'_{K(B\text{-}C)} = 0{,}314 + j0{,}774$ Ом/км,

($\Delta X = -3{,}6$ %),

$Z'_{K(C\text{-}A)} = 0{,}314 + j0{,}861$ Ом/км,

($\Delta X = 7{,}2$ %),

ΔX рассчитано относительно $\underline{Z}'_{L(\text{ф-ф})}$ транспонированной линии.

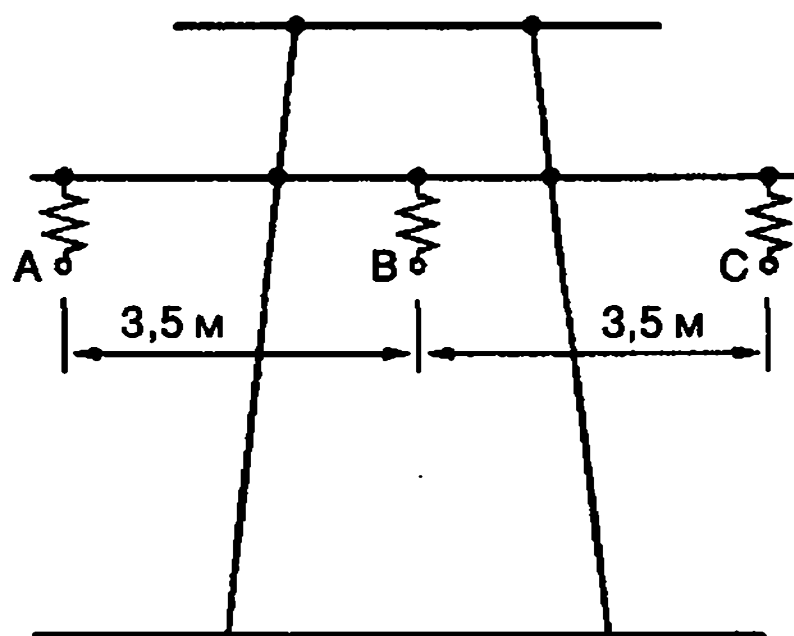


Рис. 3.133. Одноцепная воздушная линия 110 кВ, геометрия опоры, горизонтальный подвес проводов

Многоцепные воздушные линии без заземленных тросов

Выражения (3.138)—(3.141) можно использовать так же и для многоцепной воздушной линии без заземляющего проводника. Это будет продемонстрировано на следующем простом примере:

Пример.

Двухцепная воздушная линия 110 кВ.

Конструкция опоры изображена на рис. 3.134.

Все остальные данные: см. предыдущий пример.

Необходимо рассчитать сопротивление контура при двухфазном КЗ *С-А* в конце двухцепной воздушной линии, с учётом влияния параллельной линии.

Решение.

Ток проходит только в по фазам *А*, *С* и *А'*, *С'* (в двух линиях).

Это можно использовать в следующих выражениях:

$$\Delta \underline{U}_{LA} = (R_L' + jX_L') \cdot \underline{I}_A + jX_{LAC}' \cdot \underline{I}_C + jX_{LAA'}' \cdot \underline{I}_{A'} + jX_{LAC'}' \cdot \underline{I}_{C'}; \quad (3.152)$$

$$\Delta \underline{U}_{LC} = (R_L' + jX_L') \cdot \underline{I}_C + jX_{LCA}' \cdot \underline{I}_A + jX_{LCA'}' \cdot \underline{I}_{A'} + jX_{LCC'}' \cdot \underline{I}_{C'}. \quad (3.153)$$

Благодаря симметричному расположению проводников относительно опоры токи в проводах обеих линий должны быть равны. Тогда при двухфазном КЗ справедливы следующие соотношения:

$$\underline{I}_{К3} = \underline{I}_C = \underline{I}_{C'} = -\underline{I}_A = -\underline{I}_{A'}$$

В результате выражения (3.152) и (3.153) упрощаются:

$$\Delta \underline{U}_{LC} = \underline{I}_{К3}(R_L' + jX_L' - jX_{LCA}' - jX_{LCA'}' + jX_{LCC'}'); \quad (3.154)$$

$$\Delta \underline{U}_{LA} = \underline{I}_{К3}(-R_L' - jX_L' + jX_{LAC}' + jX_{LAC'}' - jX_{LAA'}'). \quad (3.155)$$

Сопротивление контура для 1-ой цепи определяется следующим выражением:

$$\underline{Z}_{К(C-A)п}' = \frac{\Delta \underline{U}_{LC} - \Delta \underline{U}_{LA}}{\underline{I}_{К3}};$$

$$\underline{Z}_{К(C-A)п}' = 2 \cdot R_L' + j(2 \cdot X_L' - X_{LCA}' - X_{LAC}'\{+X_{LCC'}' + X_{LAA'}' - X_{LCA'}' - X_{LAC'}'\}). \quad (3.156)$$

Выражение в фигурных скобках определяет влияние параллельной линии.

Подставляя (3.46) и (3.47) в (3.156), получаем следующее:

$$\underline{Z}_{К(C-A)п}' = 2 \cdot R_L + j2\omega 10^{-4} \times \left[2 \cdot \ln\left(\frac{a_{31}}{r} \cdot \sqrt{\frac{a_{13'} \cdot a_{31'}}{a_{11'} \cdot a_{33'}}}\right) + 0{,}5\mu_1\right] \quad (3.157)$$

Подкорневое выражение определяет влияние параллельной линии.

Численно $\underline{Z}_{К(C-A)п}' = 0{,}314 + j0{,}879$ Ом/км

Относительно одноцепной линии ($j0{,}861$ Ом/км) реактивное сопротивление увеличилось на 2,1 %. Относительно реактивного сопротивления транспонированной линии ($j0{,}806$ Ом/км) — на 9,9 %.

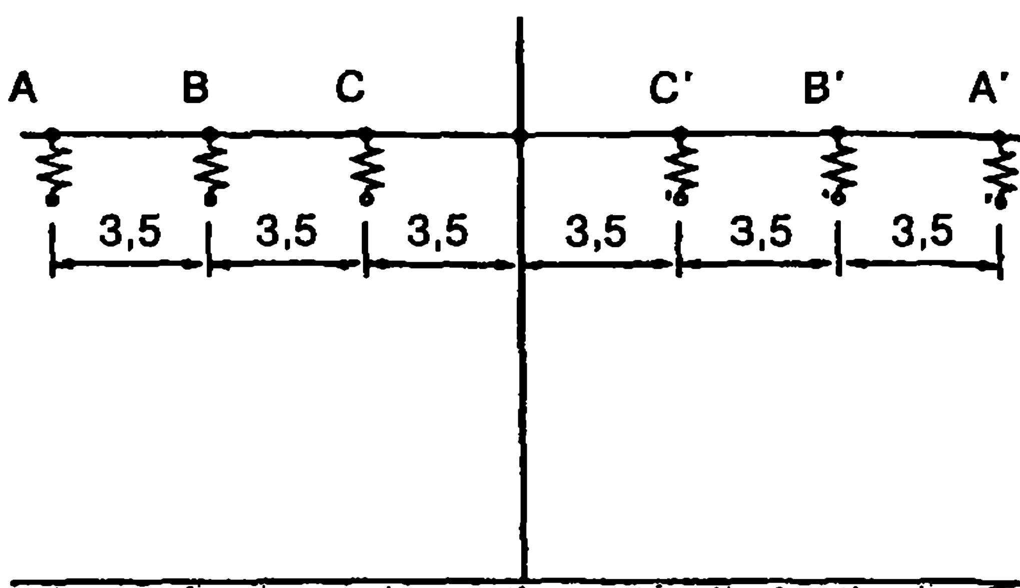


Рис. 3.134. Двухцепная линия, конструкция опоры

На два других контура влияние параллельной линии значительно ниже (< 0,5 %).

Наихудший случай двухфазного КЗ без земли может быть определён по выражению (3.157).

Подобный расчёт может быть проведен для замыкания фазы на землю.

Линии с заземленными тросами.

В этом случае существует дополнительная магнитная связь фазных проводов с заземленным проводом (тросом) (рис. 3.135).

В выражения (3.138)—(3.141) необходимо добавить соответствующие слагаемые.

$$\Delta \underline{U}_{LA} = \underline{U}_{L1A} - \underline{U}_{L2A} = (R'_{LA} + jX'_{LA}) \cdot \underline{I}_A + jX'_{LAB} \cdot \underline{I}_B + jX'_{LAC} \cdot \underline{I}_C - jX'_{LA\text{-}ET} \cdot \underline{I}_{ET} + R'_E \cdot \underline{I}_E; \quad (3.159)$$

$$\Delta \underline{U}_{LB} = \underline{U}_{L1B} - \underline{U}_{L2B} = (R'_{LB} + jX'_{LB}) \cdot \underline{I}_B + jX'_{LBA} \cdot \underline{I}_A + jX'_{LBC} \cdot \underline{I}_C - jX'_{LB\text{-}ET} \cdot \underline{I}_{ET} + R'_E \cdot \underline{I}_E; \quad (3.160)$$

$$\Delta \underline{U}_{LC} = \underline{U}_{L1C} - \underline{U}_{L2C} = (R'_{LC} + jX'_{LC}) \cdot \underline{I}_C + jX'_{LCA} \cdot \underline{I}_A + jX'_{LCB} \cdot \underline{I}_B - jX'_{LC\text{-}ET} \cdot \underline{I}_{ET} + R'_E \cdot \underline{I}_E, \quad (3.161)$$

где $jX'_{LA\text{-}ET}$, $jX'_{LB\text{-}ET}$, $jX'_{LC\text{-}ET}$ — сопротивления взаимоиндукции между соответствующей фазой и тросом.

с учетом соотношений

$$\underline{I}_E + \underline{I}_{ET} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \quad (3.162)$$

и

$$\underline{I}_{ET} = \frac{R'_E + jX'_{LA\text{-}ET}}{R'_E + R'_{ET} + jX'_{ET}} \cdot \underline{I}_A + \frac{R'_E + jX'_{LB\text{-}ET}}{R'_E + R'_{ET} + jX'_{ET}} \cdot \underline{I}_B + \frac{R'_E + jX'_{LC\text{-}ET}}{R'_E + R'_{ET} + jX'_{ET}} \cdot \underline{I}_C, \quad (3.163)$$

где $\underline{I}_{ET}$ — ток нулевой последовательности в тросе, R'_{ET} и jX'_{ET} — активные и реактивные составляющие сопротивления троса.

Выражения (3.159)—(3.163) можно записать следующим образом:

$$\Delta \underline{U}_{LA} = \underline{Z}'_{LAA} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}'_{LAB} \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}'_{LAC} \cdot \underline{I}_C; \quad (3.164)$$

$$\Delta \underline{U}_{LB} = \underline{Z}'_{LBA} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}'_{LBB} \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}'_{LBC} \cdot \underline{I}_C; \quad (3.165)$$

$$\Delta \underline{U}_{LC} = \underline{Z}'_{LCA} \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}'_{LCB} \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}'_{LCC} \cdot \underline{I}_C, \quad (3.166)$$

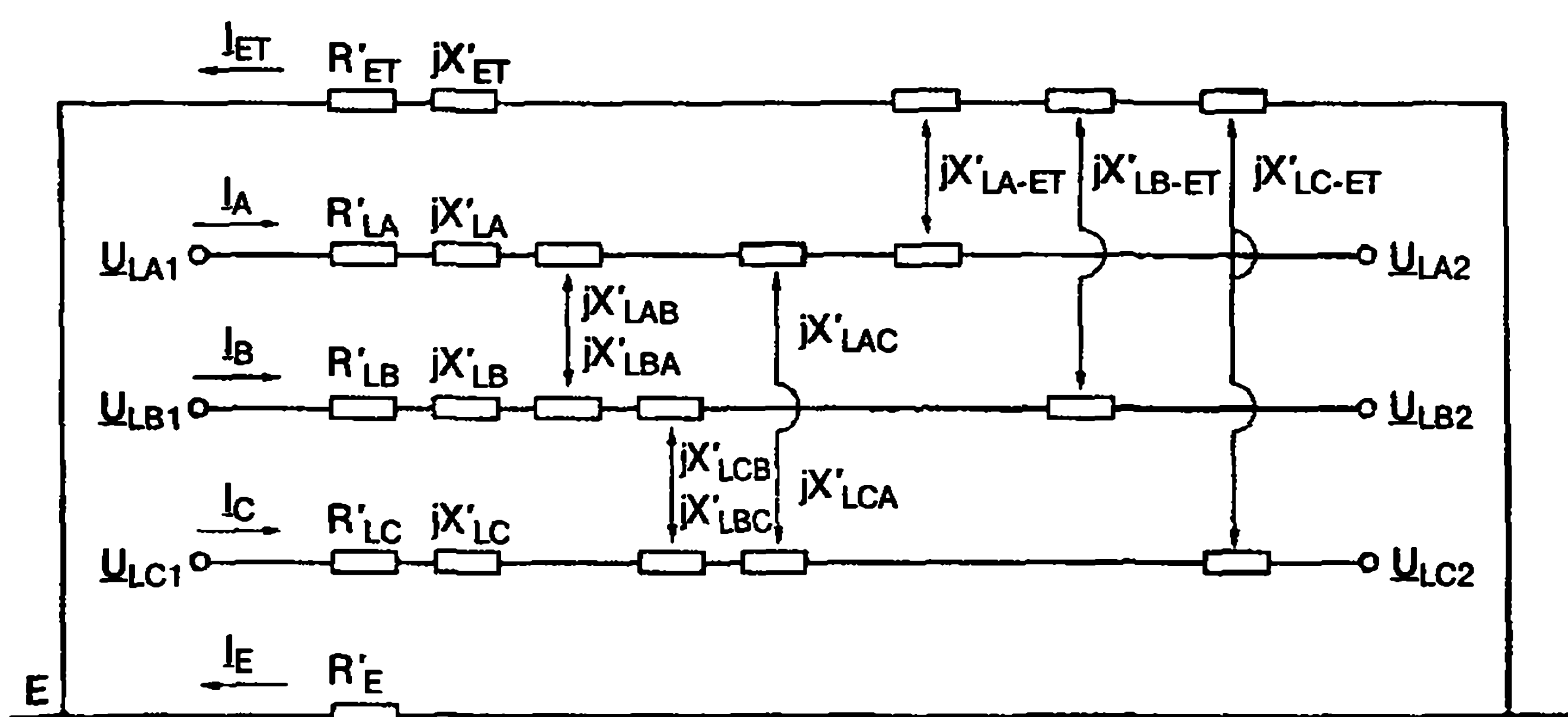


Рис. 3.135. Эквивалентная схема замещения одноцепной воздушной линии с заземленным тросом (длиной 1 км)

где:

$$\underline{Z}'_{LAA} = R_E' + R'_{LA} + jX'_{LA} - \frac{(R'_E + jX'_{LA\text{-}ET})^2}{R'_E + R'_{ET} + jX'_{ET}}; \quad (3.167)$$

$$\underline{Z}'_{LAB} = \underline{Z}'_{LBA} = R_E' + jX'_{LAB} - \frac{(R'_E + jX'_{LA\text{-}ET})(R'_E + jX'_{LB\text{-}ET})}{R'_E + R'_{ET} + jX'_{ET}}. \quad (3.168)$$

Упрощённая эквивалентная схема представлена на рис. 3.136. Собственное реактивное сопротивление заземленного провода троса (X'_{ET}) рассчитывается по выражению (3.146) точно также как и собственное реактивное сопротивление фазного провода. В незаземленных системах обычно используются стальные заземляющие тросы. В этом случае в выражениях (3.132), (3.133) и (3.149) должно использоваться значение относительной магнитной проницаемости $\mu_1 = 50—100$.

Активное сопротивление также должно быть рассчитано с учётом свойств материала.

Для расчёта сопротивлений взаимоиндукции между проводами фаз и тросом $X'_{LA\text{-}ET}$, $X'_{LB\text{-}ET}$, $X'_{LC\text{-}ET}$ используются выражения (3.147), куда необходимо подставить соответствующие расстояния между фазными проводами и заземленным тросом.

Выражения (3.164)—(3.166) могут быть представлены в форме матрицы:

$$\Delta\underline{U} = \begin{bmatrix} \Delta\underline{U}_{LA} \\ \Delta\underline{U}_{LB} \\ \Delta\underline{U}_{LC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{LAA} & \underline{Z}'_{LAB} & \underline{Z}'_{LAC} \\ \underline{Z}'_{LBA} & \underline{Z}'_{LBB} & \underline{Z}'_{LBC} \\ \underline{Z}'_{LCA} & \underline{Z}'_{LCB} & \underline{Z}'_{LCC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \boldsymbol{Z}'_L \cdot \underline{\boldsymbol{I}}, \quad (3.169)$$

$\boldsymbol{Z}'_L$ в этом случае представляет собой матрицу продольных сопротивлений линии.

Эта матрица часто используется для компьютерных расчётов (рис. 3.137).

Сопротивление контура можно определить прямо из этой матрицы.

Примеры.

Однофазное замыкание на землю $K_A^{(1)}$.

Точка $\underline{U}_{LA2}$ на рис. 3.136 должна быть соединена с землёй. Поэтому протекают

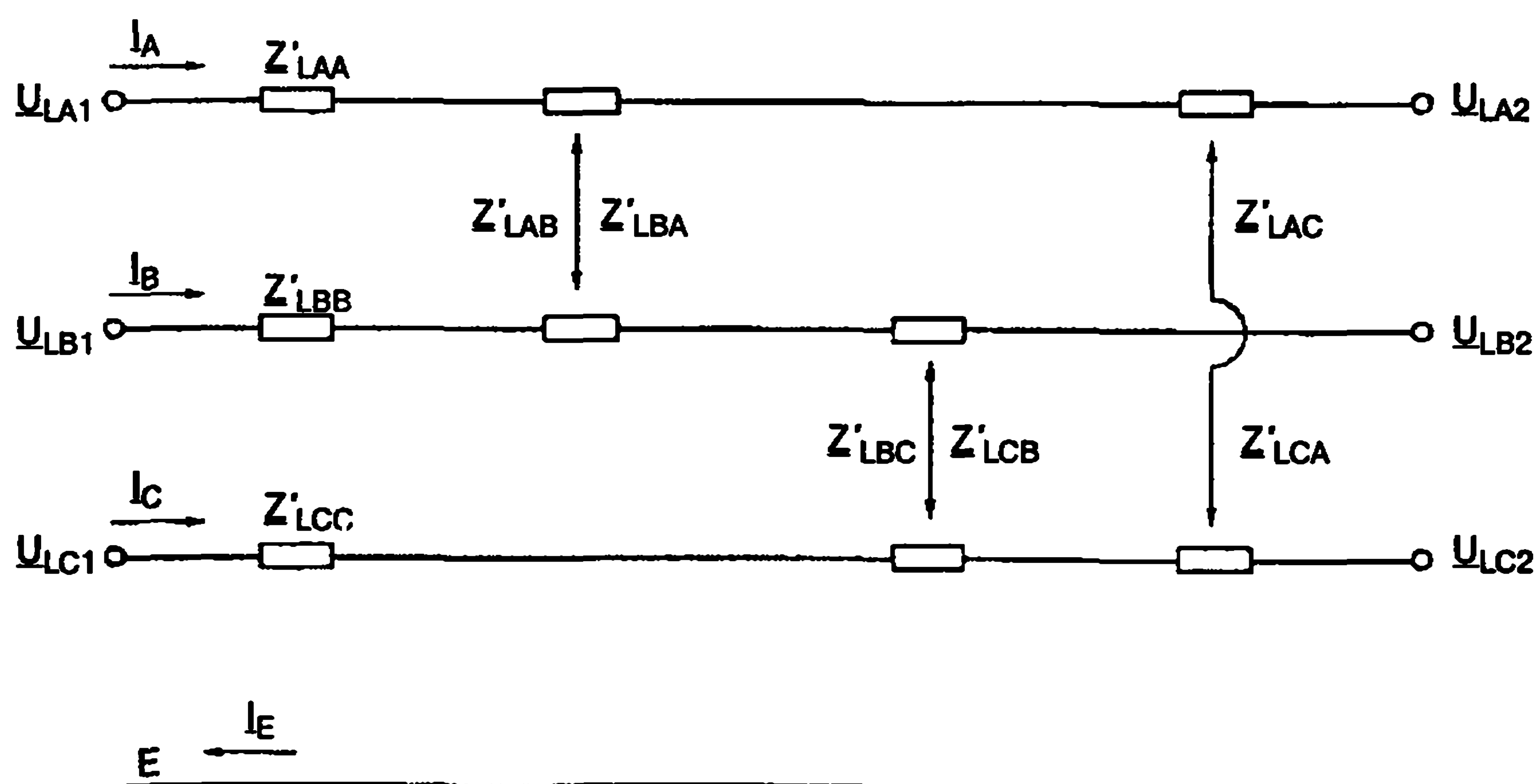
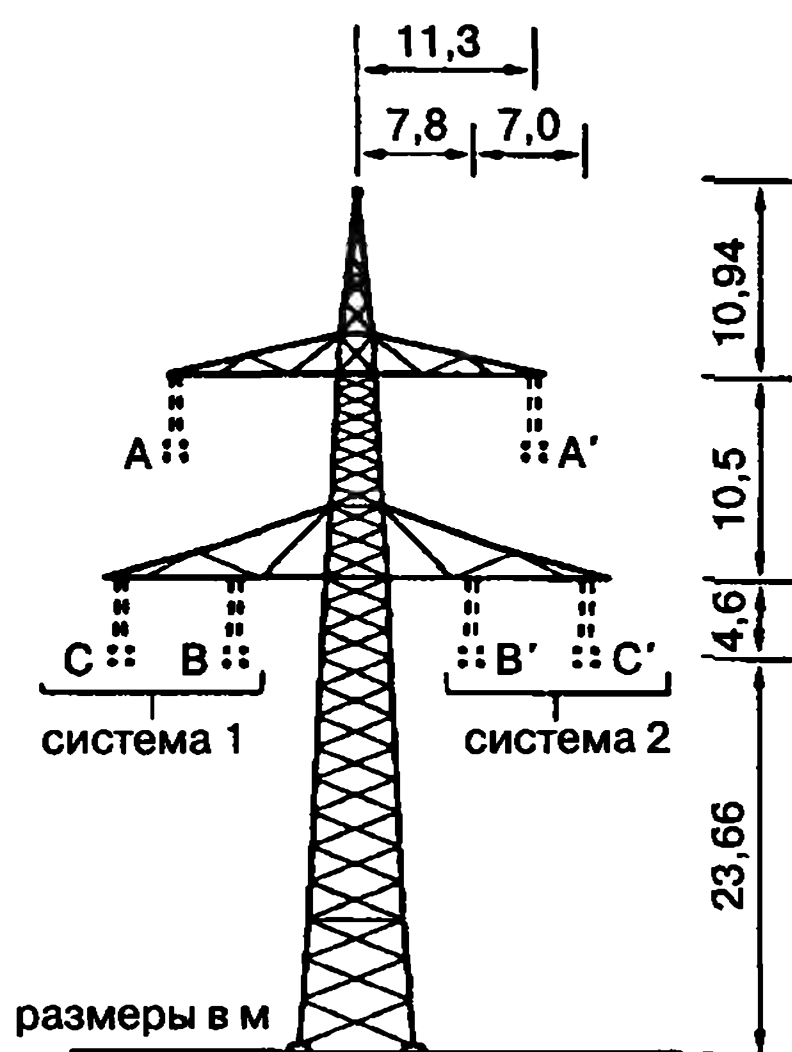


Рис. 3.136. Упрощенная схема замещения воздушной линии



Провод: 4 × 240/40 Al/St
4 провода в пучке,
расстояние между проводниками в пучке: 40 см
Заземленный трос: 240/40 Al/St
Удельное сопротивление земли: 100 Ом · м

$$\underline{Z}'_L = \begin{bmatrix} (0{,}066 + j0{,}461) & (0{,}035 + j0{,}204) & (0{,}035 + j0{,}206) \\ (0{,}035 + j0{,}204) & (0{,}065 + j0{,}474) & (0{,}035 + j0{,}241) \\ (0{,}035 + j0{,}206) & (0{,}035 + j0{,}241) & (0{,}065 + j0{,}478) \end{bmatrix} \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

Рис. 3.137. Двухцепная линия 380 кВ, геометрия опоры и матрица продольных сопротивлений для одноцепной линии (система 2 изолирована и разомкнута)

только токи $\underline{I}_A$ и $\underline{I}_E = -\underline{I}_A$. Итоговое сопротивление контура: $\underline{Z}'_{LAA} = 0{,}066 + j0{,}461$.

Реактивное сопротивление, измеряемое защитой, можно получить, разделив, мнимую часть $\underline{Z}'_{LAA}$ на $1 + X_E/X_L$, где X_E/X_L соответствует уставке коэффициента компенсации нулевой последовательности в реле.

Сопротивления транспонированной линии, вычисляемые по выражениям (3.132) и (3.133), в этом случае равны:

Сопротивление прямой последовательности:

$\underline{Z}'_1 = 0{,}0301 + j0{,}2537$ Ом/км.

Сопротивление нулевой последовательности:

$\underline{Z}'_0 = 0{,}1360 + j0{,}9055$ Ом/км.

Тогда $X_E/X_L = 0{,}8564$ и реактивное сопротивление, измеряемое в реле:

$X'_{LA\text{-}E} = 0{,}461/(1 + 0{,}8564) = 0{,}2483$ Ом/км.

$\Delta X'$ относительно сопротивления прямой последовательности транспонированной линии ($X'_1 = 0{,}2537$) равно −2,2 %.

Двухфазное короткое замыкание $K^{(2)}_{BC}$ (без земли).

Справедливо следующее: $\underline{I}_C = -\underline{I}_B$ и $\underline{I}_A = 0$; $\underline{U}_{LB2} = \underline{U}_{LC2}$.

Результирующее сопротивление контура:

$\underline{Z}'_{K(B\text{-}C)} = \underline{Z}'_{LBB} + \underline{Z}'_{LCC} - \underline{Z}'_{LBC} - \underline{Z}'_{LCB} =$
$= 0{,}060 + j0{,}470$ Ом/км.

Сопротивление, измеряемое реле, равно половине полного сопротивления контура:

$X'_{B\text{-}C} = 0{,}470/2 = 0{,}235$ Ом/км,

$\Delta X' = -7{,}4$ % (по отношению к $X'_1 =$
$= 0{,}2537$ Ом/км).

Параллельные линии с заземленными тросами.

Сопротивление контура может быть рассчитано аналогичным способом, с учётом сопротивлений взаимоиндукции между всеми остальными проводниками и заземленными тросами.

Для этих относительно сложных расчётов созданы специальные компьютерные программы.

Таблица 3.7

Погрешности измерения из-за влияния несимметрии одноцепной и двухцепной линии

Тип замыкания	Измерительный контур	ΔX%, одноцепная линия	ΔX%, двухцепная линия
однофазное КЗ $K^{(1)}$:			
A-E	*A-E*	–3,5...0,6	–3,5...0,6
B-E	*B-E*	1,2...–1,5	–1,6...–2,1
C-E	*C-E*	1,8...–0,5	3,8...–0,5
двухфазное КЗ $K^{(2)}$:			
A-B	*A-B*	3,4	3,1
B-C	*B-C*	–7,5	–7,7
C-A	*C-A*	3,3	3,3
трёхфазное КЗ $K^{(3)}$:			
A-B-C	*A-B*	3,4	2,6
	B-C	–7,5	–7,7
	C-A	3,3	2,8

В табл. 3.7 приведены рассчитанные ошибки измерений для несимметричной линии относительно сопротивления прямой последовательности транспонированной линии [3.36]. Напряжение линии 380 кВ, опора линии представлена на рис. 3.137.

Реактивные сопротивления контуров определяются по выражениям (3.28) и (3.29).

При расчёте замыкания на землю на двухцепной линии предполагается, что используется компенсация влияния параллельной линии в соответствии с выражением (3.128), т. е. ошибки измерений для замыканий фаза-земля, приведенные в таблице, обусловлены только несимметрией расположения проводников.

Разброс значений сопротивлений контуров замыкания на землю обусловлен различием условий заземления и мощности источников питания на двух концах линии.

Наименьшее реактивное сопротивление соответствует наименьшему расстоянию между проводниками, т. е.:

— петле фаза—фаза с наименьшим расстоянием между фазными проводами;

— контуру замыкания на землю с наименьшим расстоянием между фазным проводником и заземляющим проводником.

Два этих контура определяют наибольшее расширение зоны.

Можно также заметить, что наибольшая ошибка возникает в случае замыкания между фазами.

Сумма токов нагрузки в неповрежденных фазах несимметричной линии вызывает появление дополнительного напряжения на повреждённом контуре. Обычно это влияние пренебрежимо мало (< 1 %).

На длинных линиях с большой передаваемой мощностью или маленькой мощностью питающих источников (большое сопротивление источника) токи нагрузки могут достигать значения токов коротких замыканий. Тогда их влияние увеличива-

ется, погрешность может достигать нескольких процентов. [3.37, 3.38]

Компенсация влияния фазных токов.

Теоретически погрешности, внесённые несимметрией линии, могут быть полностью устранены. Для этого уставки должны быть выбраны специально для каждой фазы так же, как и компенсация фазными токами в соответствии с выражениями (3.164)—(3.166) (компенсация здоровых фаз) [3.37].

Для двухцепной линии уравнения должны учитывать влияния фазных токов на параллельной линии [3.39,3.40].

Более того, измерения на неповрежденных фазах должны быть блокированы, т. к. существует риск излишнего срабатывания. Эта компенсация аналогична компенсации влияния параллельной линии для составляющих нулевой последовательности (см. п.п. 3.5.3).

В целом, это бы значительно усложнило дистанционные защиты. Уставки и наладка стали бы менее явными.

Поэтому на практике компенсация влияния фазных токов не применяется. Расчёт места повреждения по сохранённым параметрам повреждения, тем не менее, является возможным.

Уставки защиты на нетранспонированных линиях.

На одноцепных линях влияние несимметрии по сравнению с симметричной линией (треугольное расположение проводников) или транспонированной линией значительно меньше 10 %.

При уставке первой ступени, соответствующей 85 % длины линии, возможное расширение зоны может составить 7,5 %, что учитывается запасом в 15 %.

При уставке 90 % основным для расчёта должен быть контур с наибольшей отрицательной ошибкой.

Для ступеней с полным охватом несимметрия может быть учтена 5 % увеличением уставки.

В случае многоцепных линий влияние должно быть оценено отдельно с учетом геометрии опоры [3.41].

3.5.6. Последовательная компенсация

Пропускная способность линий СВН может быть увеличена при установке устройства последовательной (продольной) емкостной компенсации (УПК), содержащего батареи конденсаторов.

Отрицательное реактивное сопротивление батареи конденсаторов ($X_C = -1/\omega C$) компенсирует часть продольного реактивного сопротивления линии ($X_L = l\omega L'$), таким образом уменьшая угол передачи. Батареи конденсаторов могут быть расположены в середине линии, на одном конце линии или на обоих концах.

Степень компенсации ($k_C = X_C/X_L$) обычно достигает приблизительно 70 %.

Батареи защищают от перенапряжений параллельным дуговым промежутком — шунтирующим разрядником — (на новых устройствах устанавливают дополнительный варистор, который сначала не рассматривается). При пробое шунтирующего разрядника батарея конденсаторов оказывается замкнутой накоротко сначала разрядником, а затем выключателем (рис. 3.138). Разрядник пробивается, когда ток достигает приблизительно 2—3 $I_{нат}$, где $I_{нат}$ — ток, соответствующий натуральной мощности линии.

В случае протекания больших токов КЗ промежуток пробивается, дуга загорается и замыкает батарею конденсаторов в течение первого полупериода тока короткого замыкания (< 10 мс). После истечении выдержки времени (примерно 200 мс)

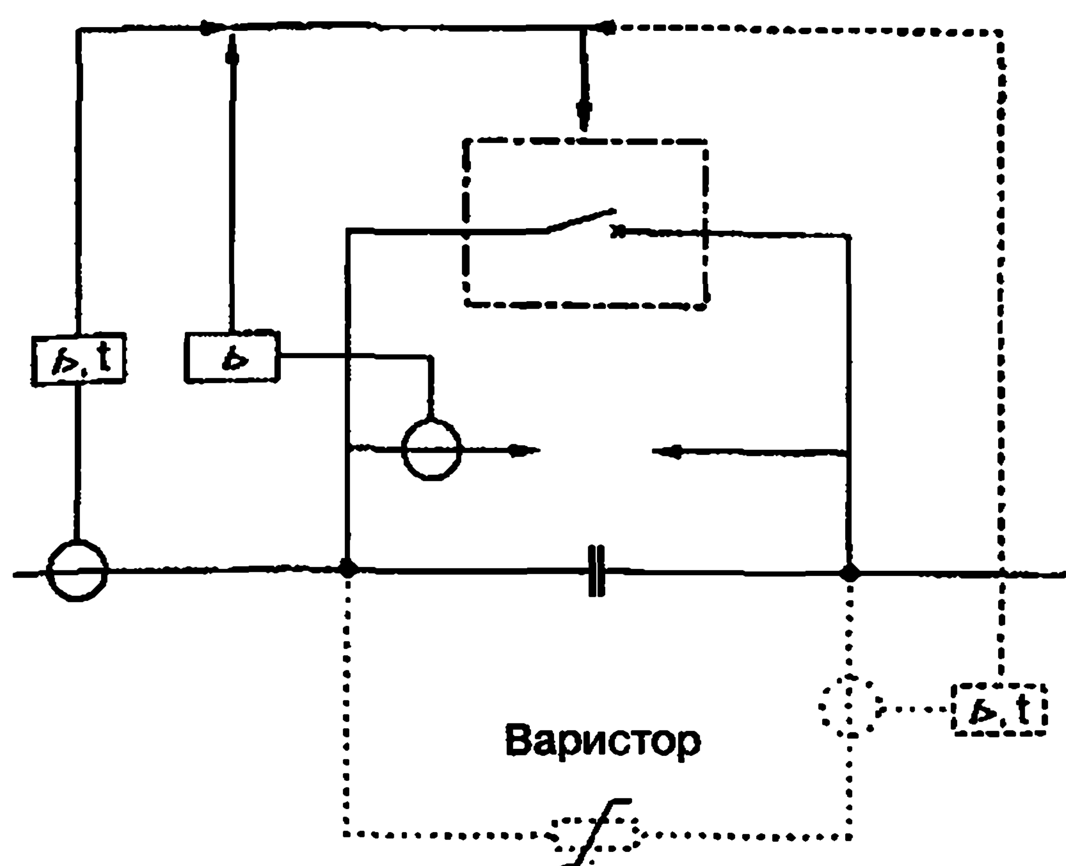
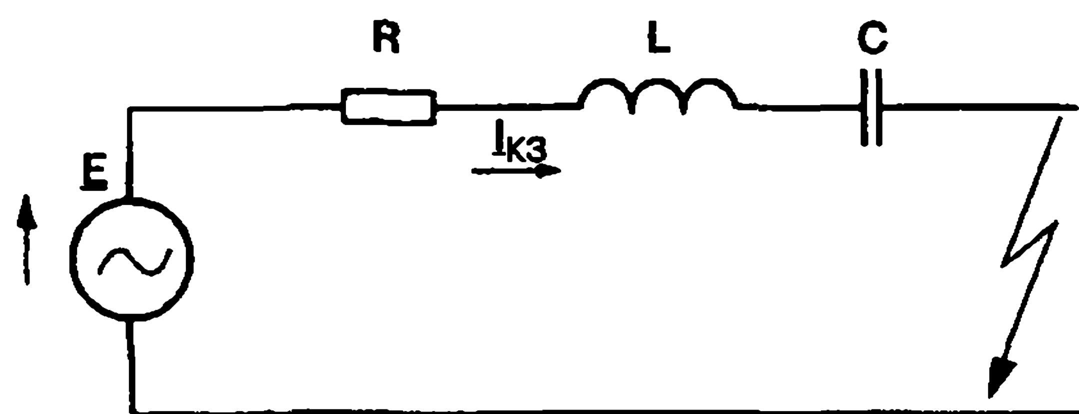


Рис. 3.138. Батарея конденсаторов и ее цепь защиты (представлены только основные функции)

выключатель автоматически отключается, и батареи конденсаторов снова включаются в работу. При этом в случае больших токов КЗ дистанционная защита работает также, как и на линии без последовательной компенсации.

Более сложные условия возникают, если при коротком замыкании промежуток не пробивается [3.42, 3.43, 3.44].

Появляются переходные колебания в *L-C-R* цепи с наложением субгармонической частоты (рис. 3.139). Вместо обычной постоянной составляющей тока короткого замыкания *LR* контура появляются медленно возрастающие колебания с частотой 10—40 Гц, в зависимости от конфигурации сети.

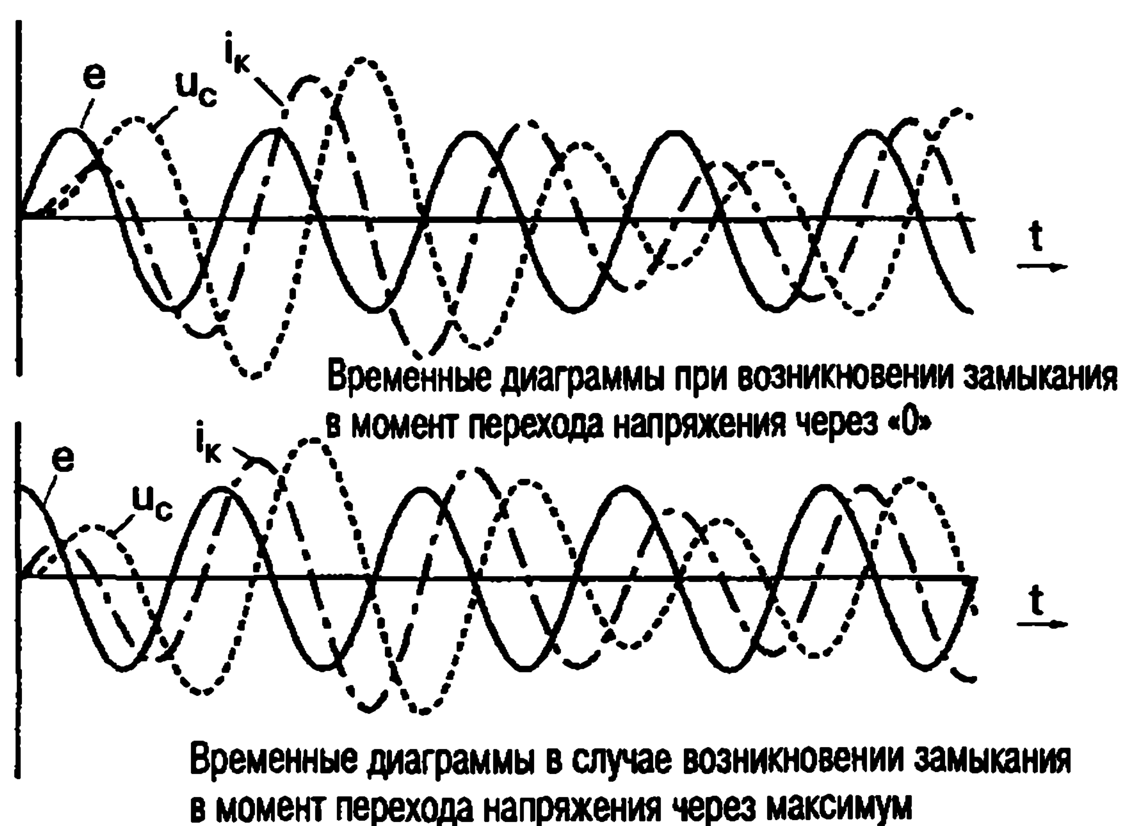


а) Эквивалентная схема

$$\hat{E}\cdot\sin(\omega t+\lambda)=L\frac{di_к}{dt}+R\cdot i_{кз}+\frac{1}{C}\int i_{кз}\,dt$$

$$i_{кз}=\hat{E}\cdot\sin(\omega t+\lambda-\Theta)+e^{-\alpha t}(K_1\cos\beta t+K_2\cos\beta t).$$

б) Дифференциальное уравнение и его решение ($i_{КЗ}$)



в) Переходный процесс

Рис. 3.139. КЗ на линии с последовательной компенсацией, переходный ток короткого замыкания (степень компенсации: $K_C = \frac{X_C}{X_L} = 50\ \%$)

Ток и напряжение короткого замыкания в месте установки реле зависят от расположения батареи конденсаторов относительно реле.

Ниже рассматриваются следующие общие явления:

- уменьшение реактивного сопротивления замыкания;
- изменение на противоположное направления тока (инверсия тока);
- изменение на противоположное направления напряжения (инверсия напряжения).

Уменьшение реактивного сопротивления замыкания.

Сначала рассмотрим случай, когда реактивное сопротивление замыкания остаётся положительным относительно места установки реле и источника питания (рис. 3.140).

В этом типичном случае короткого замыкания ток отстаёт от напряжения во всём контуре КЗ. В месте установки батареи конденсаторов напряжение получает положительное приращение. Дистанционная защита измеряет положительное реактивное сопротивление линии, как и на линии без последовательной компенсации. Однако реактивное сопротивление линии уменьшается на величину реактивного сопротивления батареи. Поэтому уставка ступени с неполным охватом защищаемой зоны должна учитывать это явление: $X_1 = k_{\text{отс1}} \cdot (X_L - X_C)$.

Накладывающиеся субгармонические колебания вызывают появление спиралеобразной кривой изменения полного сопротивления контура короткого замыкания в переходном режиме до его установившегося значения на диаграмме полного сопротивления с равновероятной возможностью как уменьшения, так и расширения зоны (рис. 3.141).

Субгармоническая частота не может быть полностью отфильтрована в реле, особенно если она близка к номинальной частоте работы системы, поэтому уставка ступени с неполным охватом должна быть снижена с учётом дополнительного коэффициента запаса $k_{\text{пер}}$ для того, что-

Рис. 3.140. КЗ на линии с последовательной компенсацией, напряжение, измеренное реле, положительно

Рис. 3.141. Замыкание на линии с последовательной компенсацией, сопротивление замыкания при переходном процессе

бы избежать излишнего охвата при переходном процессе:

$X_1^* = X_1 \cdot k_{пер}$

Если предположить линейность частотной характеристики фильтра дистанционной защиты в диапазоне низких частот (справедливо для 7SA522), субгармонические колебания ослабляются с коэффициентом $f_{суб}/f_{сети}$. Для наихудшего случая можно использовать следующее выражение:

$$k_{пер} = \frac{1}{1 + \frac{U_{пр}}{\sqrt{2} \cdot E}}, \qquad (3.170)$$

где $U_{пр}$ — напряжение пробоя дугового промежутка (разрядника);

E — ЭДС источника питания.

В следующем примере приводится оценка значения величины переходного коэффициента $k_{пер}$.

При $E = 1{,}1 \cdot 400$ кВ и $U_{пр} = 200$ кВ $k_{пер} = 0{,}76$.

При типичном значении коэффициента отстройки 1-ой ступени $k_{отс1} = 0{,}85$ и степени компенсации $k_C = 70$ % вычислим зону досягаемости первой ступени: $X_1 = 0{,}85 \cdot 0{,}76 \cdot (1 - 0{,}7) \cdot X_L = 0{,}2X_L$.

Отсюда видно, что на линиях с последовательной компенсацией быстродействующая ступень может быть эффективна только при очень близких замыканиях.

Инверсия напряжения.

Инверсия напряжения возникает в том случае, если отрицательное реактивное сопротивление батареи конденсаторов больше, чем положительное сопротивление линии (рис. 3.142). В этом случае реактивное сопротивление контура относительно места установки реле отрицательно. Ток, однако, остаётся индуктивным, т. к. полное сопротивление контура до источника питания ЭДС положительно.

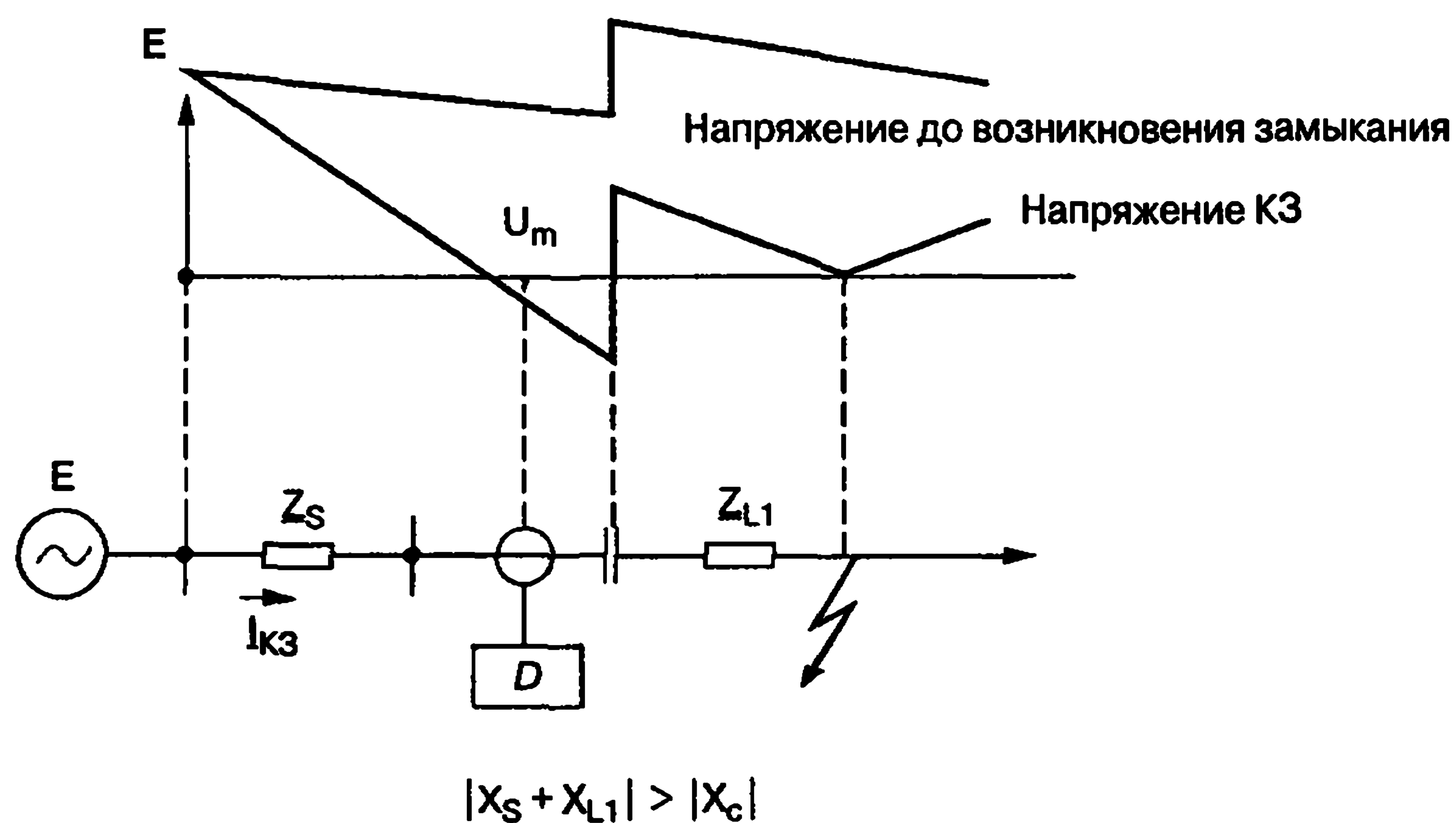
В этом случае напряжение в месте установки реле имеет противоположную фазу, т. е. в точке, где производятся измерения, напряжение отстаёт от тока приблизительно на 90°.

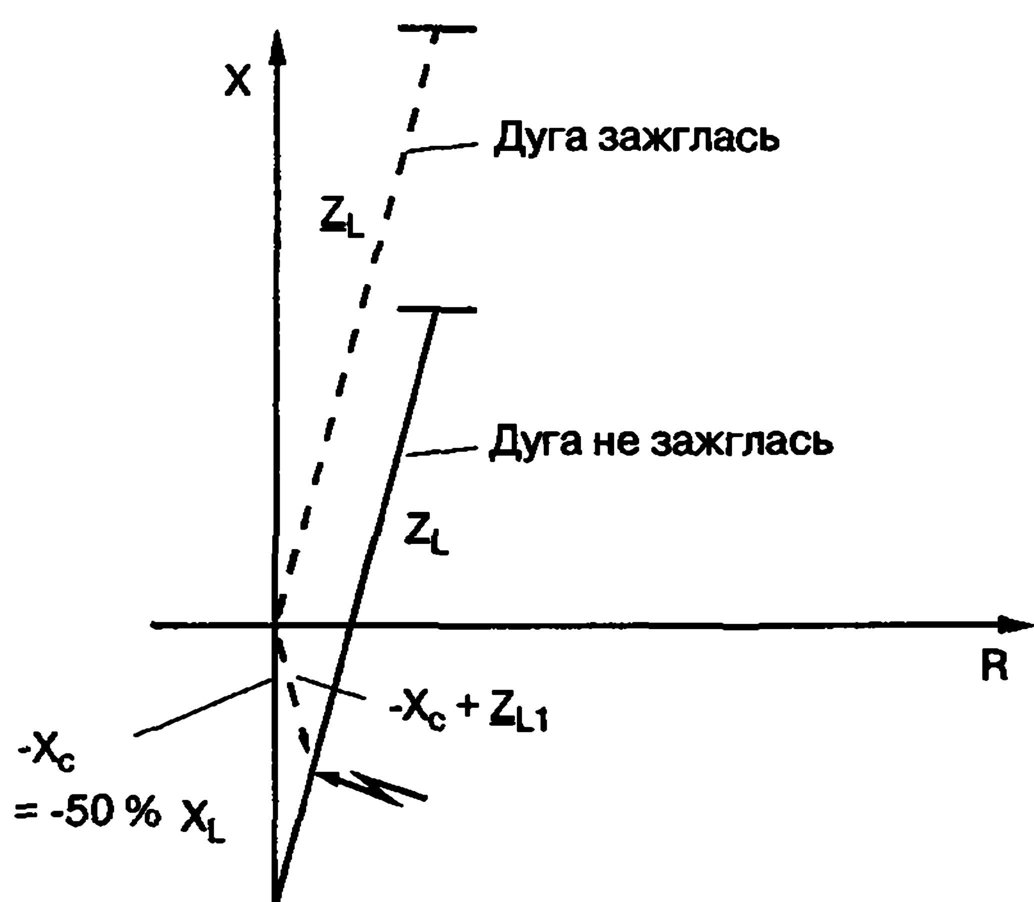
Поэтому измеренное сопротивление контура отрицательно. Это означает, что при определении направления замыкания по напряжениям повреждённых фаз будет выявлено замыкание в обратном направлении, хотя, на самом деле, оно находится в прямом направлении.

Использование напряжений неповреждённых фаз или напряжений, занесённых в память, позволяет получить правильный результат, что рассмотрено в п.п. 3.3.2.

На рис. 3.143 представлена адаптированная характеристика реле (ступень с полным охватом) для линии с последовательной компенсацией. На диаграмме сопротивлений представлена многоугольная характеристика срабатывания дистанционной защиты с использованием напряжений повреждённых фаз. Характеристика направленности, основанная на использовании напряжений неповрежденных фаз или занесенных в память, смещена на значение полного сопротивления источника Z_S. МНО-характеристика должна быть поляризована большой долей напряжения здоровой фазы (напряжения, занесённого в память) ($k_п = 1$, см. 3.4.2), для того, чтобы максимально расширить область досягаемости в направлении отрицательных X.

Несмотря на отрицательное сопротивление батареи конденсаторов, вся длина линии лежит в прямом направлении области действия ступени с полным охватом. Ступени дистанционной защиты с полным охватом в сочетании со сравнением направлений позволяют осуществить





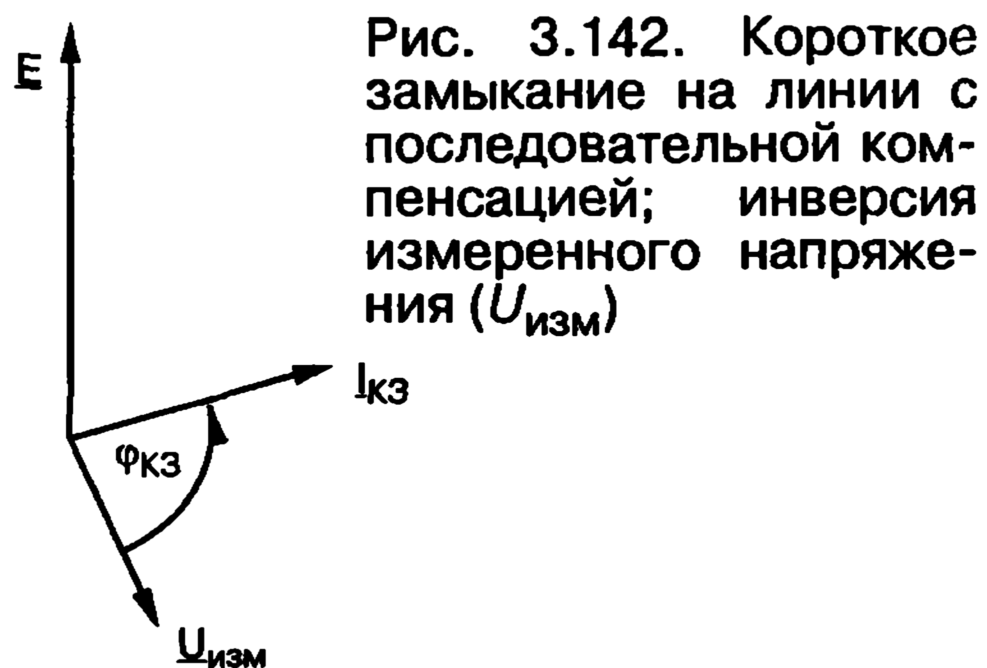
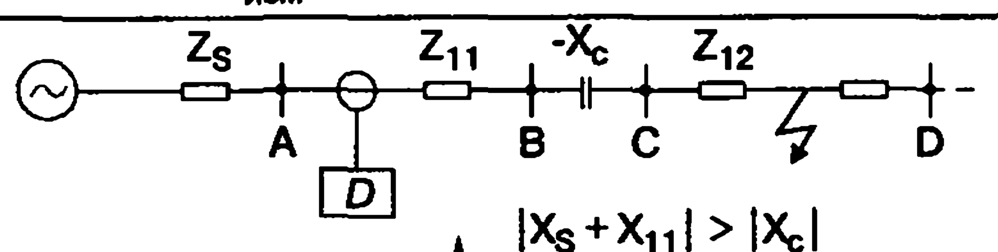


Рис. 3.142. Короткое замыкание на линии с последовательной компенсацией; инверсия измеренного напряжения ($U_{изм}$)



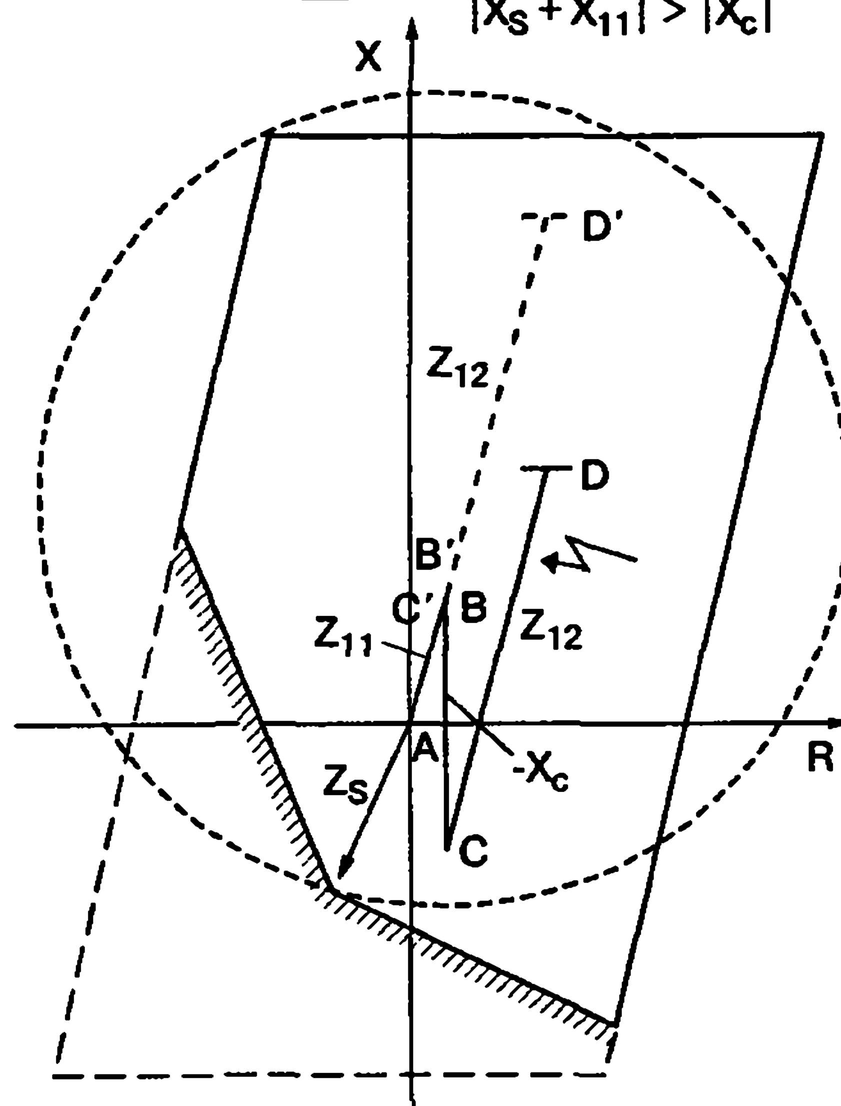


Рис. 3.43. Линия с последовательной компенсацией, дистанционная защита.

необходимую защиту линий с последовательной компенсацией. В этом случае ступень с полным охватом зоны должна иметь уставку больше, чем реактивное сопротивление некомпенсированной линии. При определении уставки требуется учет дополнительного коэффициента $1/k_{пер}$, для того чтобы компенсировать влияние субгармонических составляющих: $Z_{уст} = 1{,}2...1{,}3 \cdot (1/k_{пер}) Z_L$.

Защита со сравнением направлений может работать в сочетании как с блокирующими, так и разрешающими сигналами.

Инверсия тока

Инверсия тока возникает, когда сопротивление короткого замыкания от места повреждения до источника отрицательно (рис. 3.144).

Полное сопротивление в месте установки реле также отрицательно, т. к. инверсия тока наиболее вероятна, если замыкание находится непосредственно за

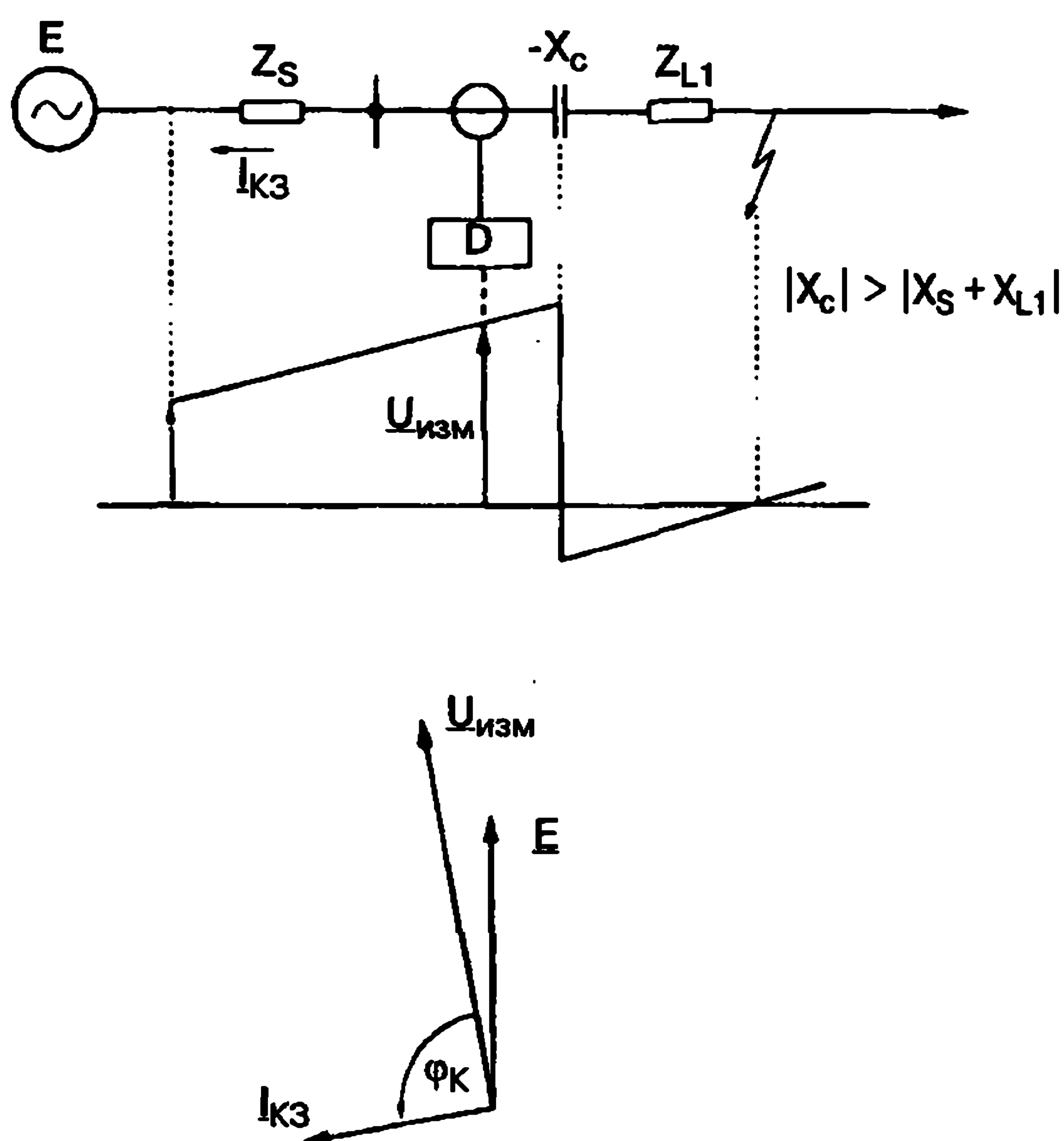


Рис. 3.144. КЗ на линии с последовательной компенсацией; инверсия фазы тока короткого замыкания

батареей конденсаторов. Однако возможна такая конфигурация системы, когда полное сопротивление в месте установки реле останется положительным.

Ток короткого замыкания в любом случае опережает напряжения здоровых фаз или напряжения, занесённые в память, приблизительно на 90°. Поэтому дистанционная защита, неправильно определив направление замыкания, будет блокироваться при внутренних замыканиях или срабатывать при внешних.

Однако инверсия тока имеет место только в некоторых случаях при особой конфигурации сети. В общем случае при КЗ протекают очень большие токи, вызывающие пробой промежутка, шунтирующего батарею конденсаторов во время КЗ. Поэтому, за исключением некоторых случаев, при проектировании защиты нет необходимости отстраиваться от инверсии тока.

Проблема инверсии тока может быть решена защитой с сравнением направления, основанной на измерении приращений ($\Delta U/\Delta I$ — измерение) Даже защита с фазным сравнением, а также, в большинстве случаев, и дифференциальная защита, в этом случае будут блокированы, т. к. будет зафиксировано сквозное замыкание.

Нелинейное сопротивление (варистор) в контуре протекания тока короткого замыкания.

Современные УПК включают в себя варистор на основе окиси металла для ограничения напряжения (рис. 3.145). Он выбирается таким образом, что пробой (шунтирование) происходит только при внутренних КЗ с большими значениями токов КЗ. При внешних замыканиях варистор только ограничивает напряжение. Батарея конденсаторов автоматически вводится в работу при исчезновении тока короткого замыкания, вызывающего сни-

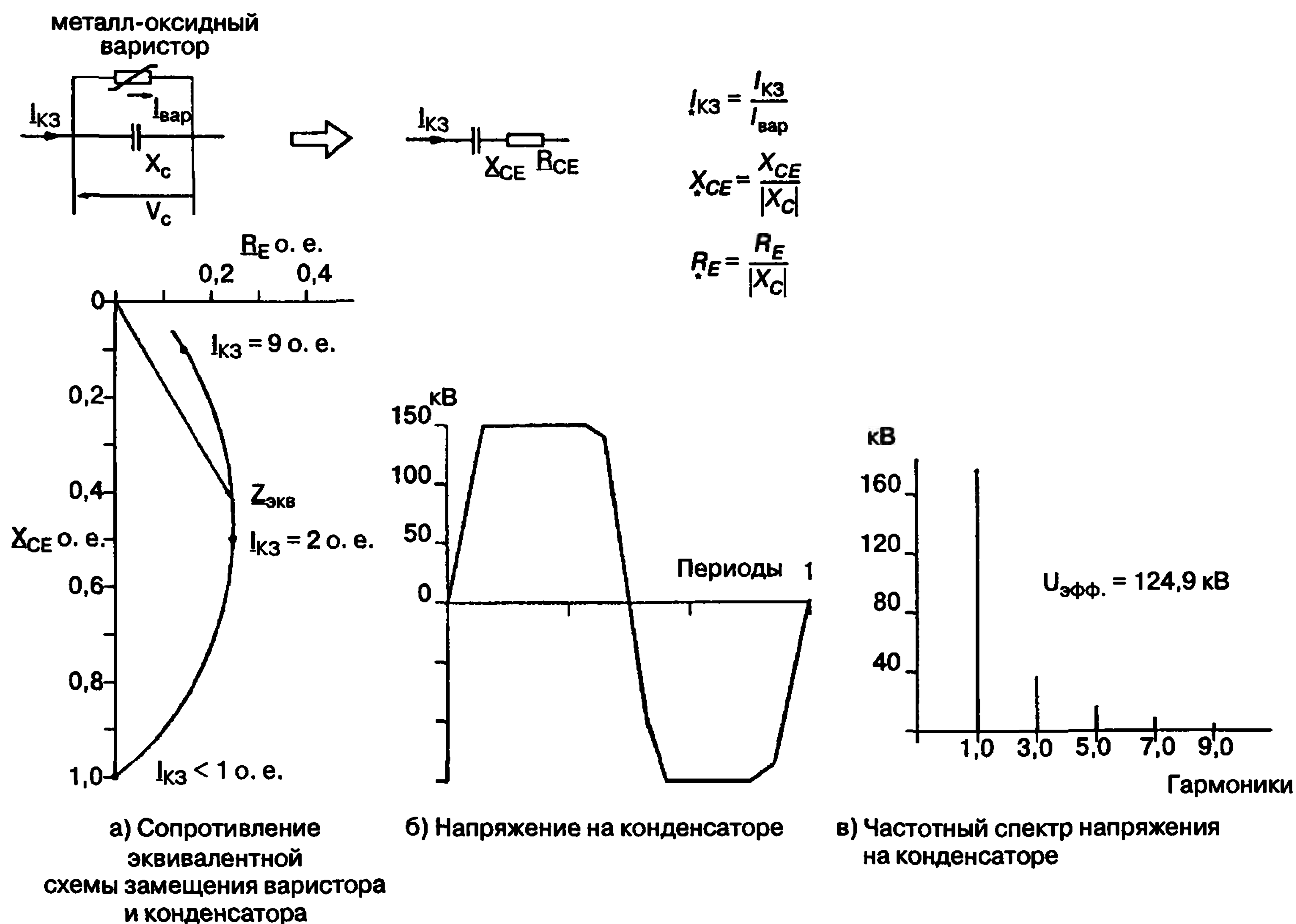


Рис. 3.145. Устройство продольной компенсации

жение напряжения ниже уровня напряжения варистора.

Варистор функционирует как переменное сопротивление в контуре короткого замыкания. Эквивалентная схема замещения и зависимость сопротивления конденсаторно-варисторной установки от тока представлены на рис. 3.145. Эквивалентное сопротивление соответствует основной составляющей. Из-за нелинейной зависимости напряжения варистора появляются высшие гармоники. В случае возникновения замыкания непосредственно за батареей конденсаторов высшие гармоники присутствуют и в напряжении короткого замыкания на входах реле. Но, благодаря тому, что в современных цифровых защитах используются фильтры Фурье, эти помехи во входном сигнале практически не влияют на точность измерений.

Эквивалентное сопротивление варистора также включает в себя и резистивную составляющую R_E, которую необходимо учитывать при выборе уставки реле (рис. 3.145, *а*).

4. Технические особенности устройств

Первые терминалы релейной защиты, выполненные полностью на микропроцессорной технике с встроенными интерфейсами связи были выпущены фирмой Siemens в 1985 году. Уже тогда имелась возможность интеграции этих защит в систему АСУ подстанции. С развитием микропроцессорной техники и средств связи техническое совершенство защит повысилось.

Ниже кратко описаны структура (рис. 4.1) и функции цифровых устройств. Подробная информация содержится в руководствах по эксплуатации защит, предоставляемых фирмами-производителями [4.1, 4.2].

4.1. Интеллектуальные электронные устройства (IED)

Современные устройства защиты являются полностью цифровыми. Это означает, что измеряемые значения (токи и напряжения) сначала преобразуются в дискретные значения, а затем уже обрабатываются.

Ниже приведены технические данные терминалов защит серии SIPROTEC 4:

Частота дискретизации	1000 Гц (1200 Гц при номинальной частоте системы 60 Гц)
Число выборок за период	20
Граничная частота фильтра нижних частот	500 Гц (600Гц)
Разрядность АЦП	16 разрядов, соответствует 65536 уровням квантования
Время хранения измеренных данных	15 с
Язык программирования	C/C++

С недавнего времени устройства релейной защиты выпускаются в виде многофункциональных универсальных устройств (IED).

Число функций, выполняемых IED, стремительно увеличивается вместе с мощностью процессора и объёмом памяти терминалов. В табл. 4.1 описана эволюция аппаратного обеспечения терминалов релейной защиты на примере серии SIPROTEC фирмы Siemens.

Одна мощная шина способна управлять всеми интегрированными функциями. Отдельные небольшие процессорные модули предназначены для обеспечения работы интерфейсов связи с увеличивши-

Таблица 4.1

Эволюция цифровых защит для сетей ВН

Год выпуска	Поколение реле	Память RAM/EPROM	Разрядность шины	Мощность процессора
1992	SIPROTEC 3	256/512k	16	1.0 MIPS
2000	SIPROTEC 4	512k/4MB + 4MB D-RAM	32	35 MIPS

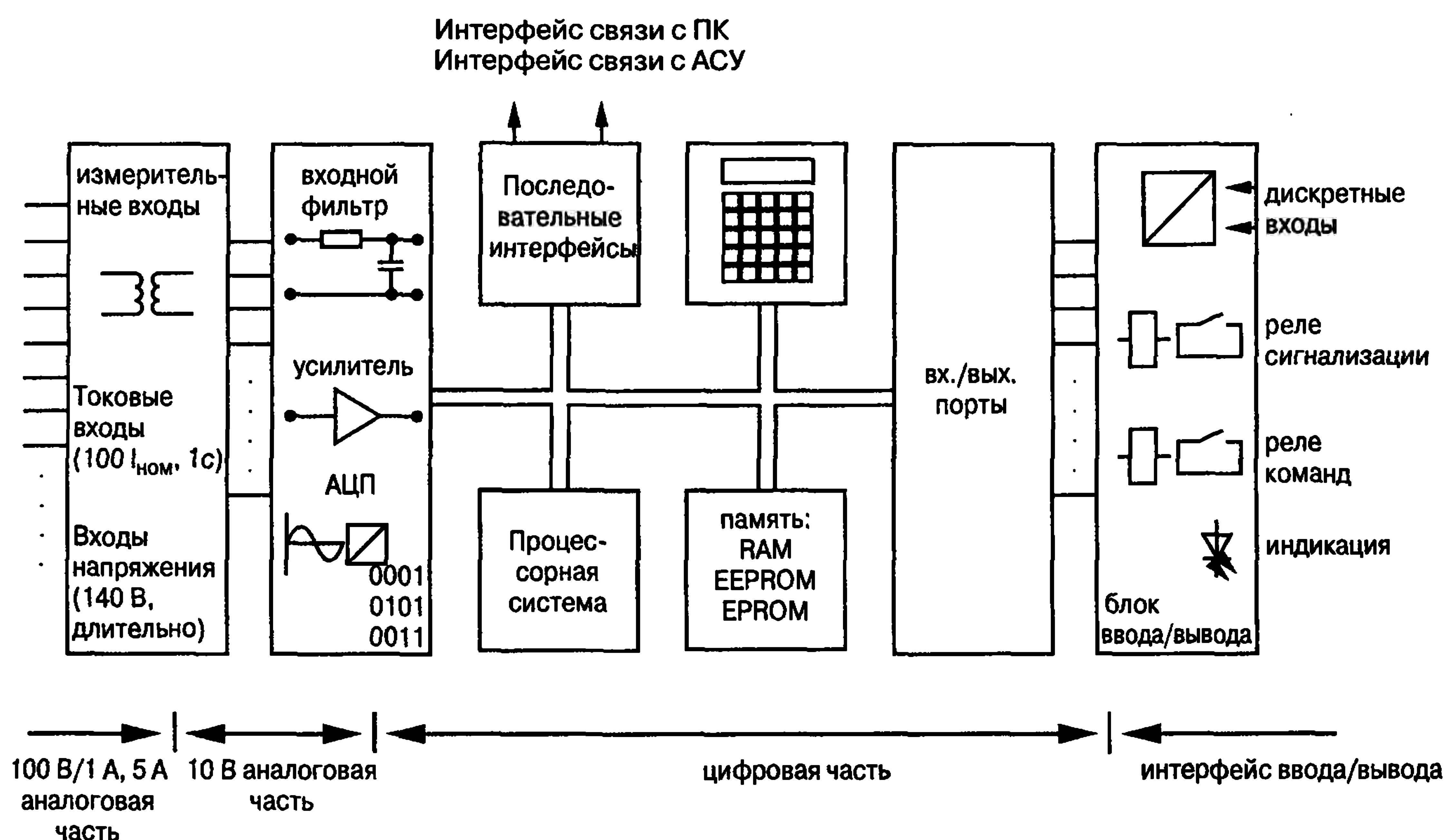


Рис. 4.1. Структура устройства цифровой защиты

мися скоростями и сложными процедурами обмена данными. Заменой этих съёмных модулей обеспечивается адаптация аппаратного обеспечения к существующим и новым стандартам связи.

Устройства последних поколений дают возможность синхронизации времени с точностью до микросекунд с помощью GPS.

Дистанционные реле на сегодняшний день выполняют все необходимые функции защит линии. Функции резервных защит, естественно, должны выполняться отдельным IED для обеспечения аппаратного резервирования. Постоянно увеличивается число «незащитных» функций, таких как измерения, контроль, управление и автоматизация. Модульная конструкция позволяет адаптировать входные/выходные интерфейсы для каждого конкретного применения.

Современные реле предназначены для продажи на мировом рынке. Они отвечают как требованиям протоколов IEC, так и ANSI/IEEE и могут быть адаптированы для работы по стандартам связи, используемым в Европе и США. В качестве информационного интерфейса устройств серии SIPROTEC 4 может быть использован как IEC60870-5-10, так и DNP3.0 либо Modbus. Новый открытый стандарт связи на подстанциях IEC 61850 прошел успешную проверку в контрольных проектах и сейчас по всему миру осуществляется его внедрение.

Устройства SIPROTEC 4 поставляются с программой DIGSI, обеспечивающей их удобную настройку и техническое обслуживание через персональный компьютер ПК (с операционной системой Windows) как по месту, так и при соединении через модем.

4.2. Техническое исполнение (конструкция)

Современные устройства защит имеют относительно небольшие размеры и помимо основных функций (в данном случае дистанционной защиты) могут выполнять множество вспомогательных функций защиты (например, защита от отказа выключателя, защита от КЗ на землю, защита от перегрузки), а также дополнительных функций, таких как измерение и управление (рис. 4.2).

Клавиатура и дисплей находятся на лицевой панели устройства. Терминалы, способные выполнять как функции защиты, так и функции управления, оснащены графическим дисплеем для отображения мнемосхемы присоединения и клавишами управления. Такие устройства могут использоваться в системе АСУ подстанции.

Размеры устройств изменяются в зависимости от числа выполняемых функций и интерфейсов. Устройства, применяемые в сетях среднего и высокого напряжения, обычно занимают 1/3—1/2 стандартной девятнадцатидюймовой стойки. Для защиты объектов СВН используются устройства, занимающие всю девятнадцатидюймовую стойку, поскольку для реализации таких защит необходимо большое число дискретных входов и выходов.

Подключение осуществляется аналогично традиционным реле.

Входы, на которые подаются токи и напряжения от ТТ и ТН, изолированы от плат процессорного обеспечения с помощью небольших входных трансформаторов. Потребляемая мощность для терминалов SIPROTEC менее 1 ВА. Статусные входы имеют оптронную развязку. Выходные реле предназначены для подключения к цепям сигнализации и выдачи команд отключения.

В обычной комплектации для внутренней установки входы/выходы терминала расположены на задней панели устройства (рис. 4.3). Связь с внешними устройствами осуществляется с помощью разъемов (параллельные проводные интерфейсы). Поперечное сечение применяе-

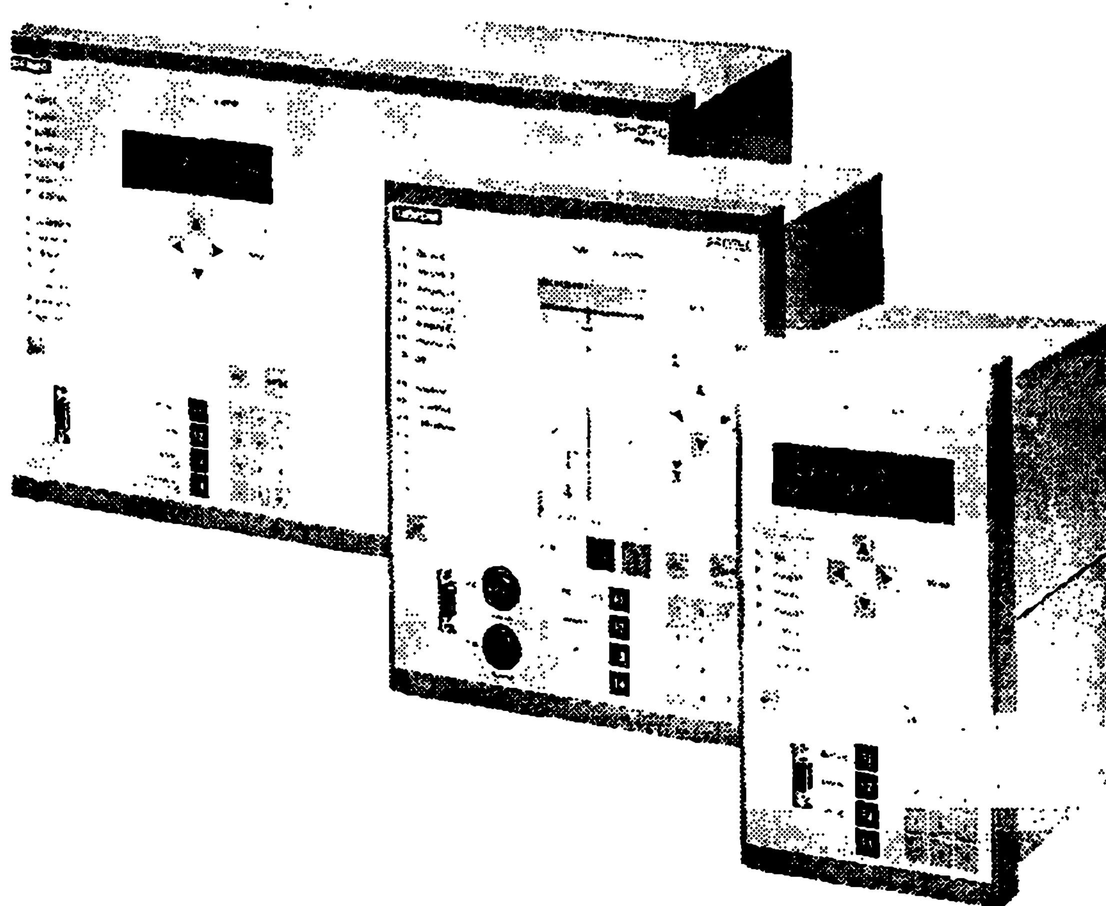


Рис. 4.2. Внешний вид современных цифровых реле серии SIPROTEC 4

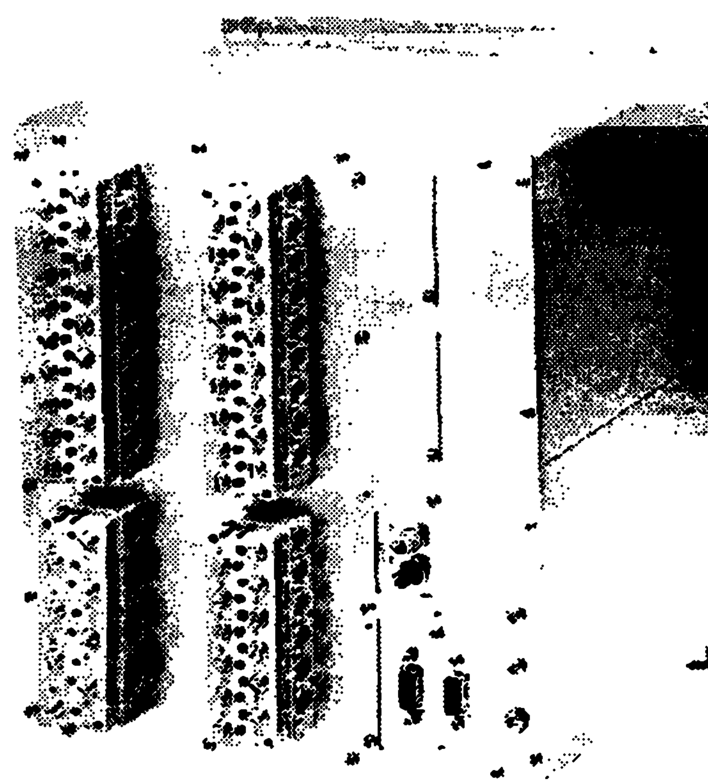


Рис. 4.3. Устройство SIPROTEC 4; вид сзади; разъемы для кабелей связи с внешним устройством; последовательные интерфейсы (справа внизу)

мых проводов: 0,5—2,5 мм^2, согласно AWG 20 — AWG 13, для цепей напряжения и 2,7—6,6 мм^2 для цепей тока. Рекомендуются кабельные или вилочные наконечники. Последовательные интерфейсы для связи с системой управления могут быть электрическими — RS232/485 (SUB-D разъем), либо оптическими — с подключением оптоволоконного кабеля ST-штекером.

4.3. Соединения терминалов

Последовательные интерфейсы для работы с терминалом и его обслуживания, также как и интерфейсы связи с АСУ подстанции, являются «новинками» цифровых устройств [4.3, 4.4].

В устройствах с цифровой связью между концами ЛЭП также имеются интерфейсы для передачи информации защиты (измеренные значения, команды).

Общее количество различных интерфейсов терминала может достигать 5.

Последовательный интерфейс для местного обслуживания с ПК

Этот интерфейс расположен на передней панели терминала. Для него нет никаких стандартов, реализация связи с реле (для задания уставок, записи/считывания данных и программ) зависит от фирмы-производителя. Для этой цели фирмой Siemens используются интерфейсы V.24/V.28 и структура протокола IEC 870-5-103.

Сервисный интерфейс для удалённого доступа

Используется либо интерфейс RS 485, либо оптический интерфейс.

Терминалы объекта могут быть связаны через коммутатор типа «звезда» либо центральный модем с телефонной связью для дистанционной работы с терминалом. Используемый протокол такой же, как и в предыдущем случае.

Интерфейс синхронизации

С помощью этого интерфейса сигнал синхронизации времени (от радиоприемника DCF77 сигнал точного времени из Braunschweig, либо от радиоприемника IRIG-B сигнал точного времени глобальной спутниковой системы GPS) может быть передан в терминал для точной синхронизации времени.

Системный/SCADA интерфейс

Этот интерфейс обеспечивает связь терминала защиты с системой управления. В зависимости от варианта использования коммуникации с системой управления могут осуществляться в соответствии с различными типами и протоколами передачи данных. В Европе широко используется стандарт IEC 870-5-103 (интерфейс и протокол). Возможно также использование LAN протоколов (например, Profibus). В США в основном используются стандарты Modbus или DNP3.0

За последние годы была проделана большая работа по разработке единого всемирного стандарта связи внутри подстанции. Новый открытый стандарт IEC 61850 опубликован и первые пилотные проекты уже введены в действие.

Интеграция устройств SIPROTEC 4 в АСУ подстанции представлена на рис. 4.4.

Интерфейс передачи данных защиты (телезащиты)

Предназначен для связи с терминалом защиты, установленным на противоположном конце линии. Для этого интерфейса не существует международных стандартов. Известно большое количество вариантов обеспечения связи либо по сетям данных, либо непосредственно по выделенным оптоволоконным каналам.

В первом случае оптический кабель соединяет реле с концентратором данных

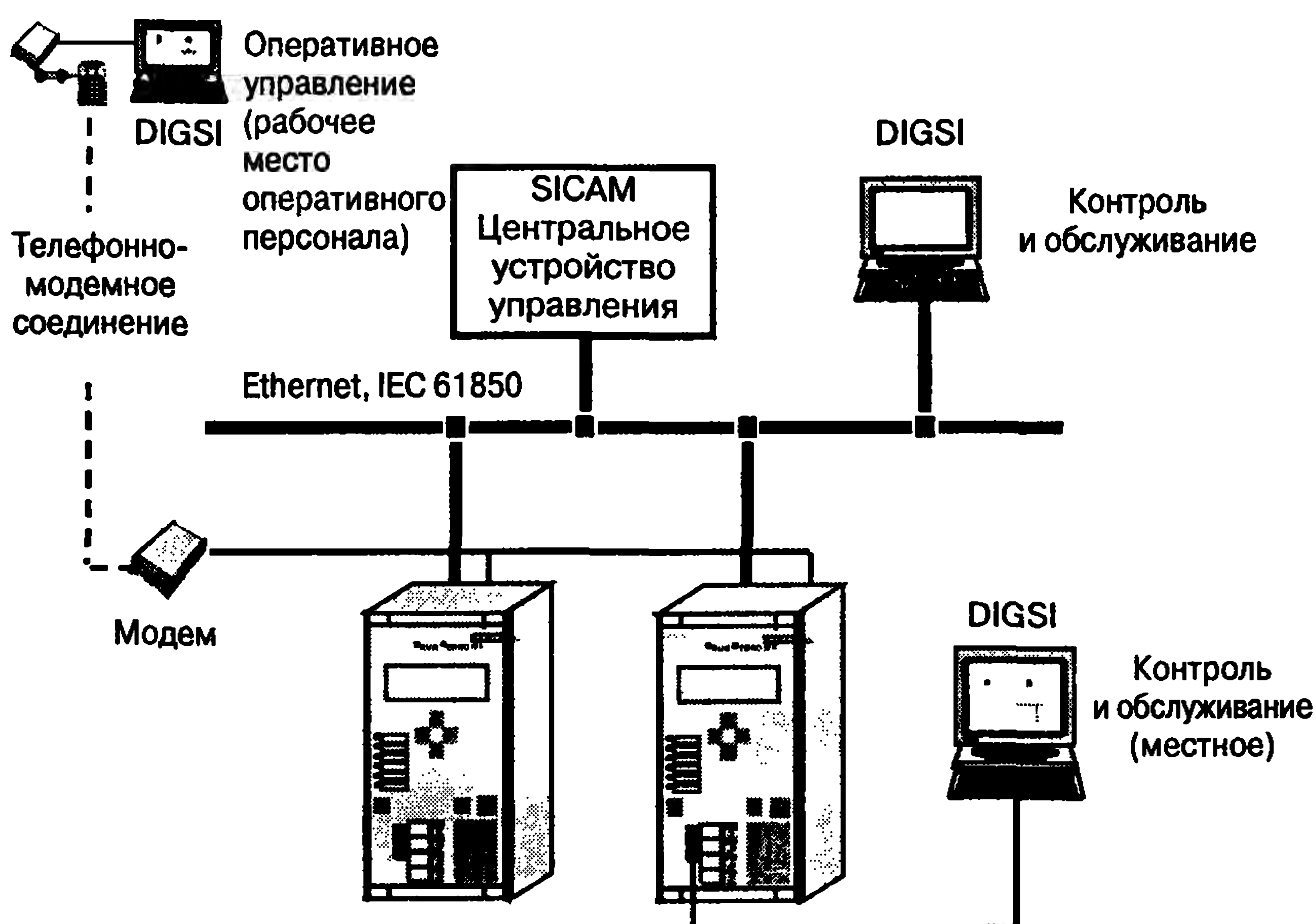


Рис. 4.4. Система автомазированного управления на подстанции с использованием устройств SIPROTEC 4

коммуникационной сети внутри подстанции, для этого используется многомодовый стекловолоконный кабель A62.5/125 µm (мах 1,5 км). Для согласования оптоволоконного интерфейса устройства защиты и стандартного проводного интерфейса концентратора применяется преобразователь сигнала (рис. 4.5).

Если возможно использование выделенного оптоволоконного кабеля для выполнения функций защиты, то терминалы могут быть соединены напрямую с помощью встроенного приёмо-передатчика (1300nm). Передача данных возможна на расстояния до 35 км. Для уменьшения затухания сигнала используются мономодовые волоконные кабели (9/125 µm) с соответствующими интерфейсами.

4.4. Интегрированные функции

В современных дистанционных реле (7SA522 и 7SA6) интегрированы все функции, необходимые для защиты воздушных и кабельных линий, включая вспомогательные схемы телезащиты, которые могут работать с традиционными (PLC, аналоговые микроволновые, контрольные провода) или современными цифровыми каналами связи (рис. 4.6)

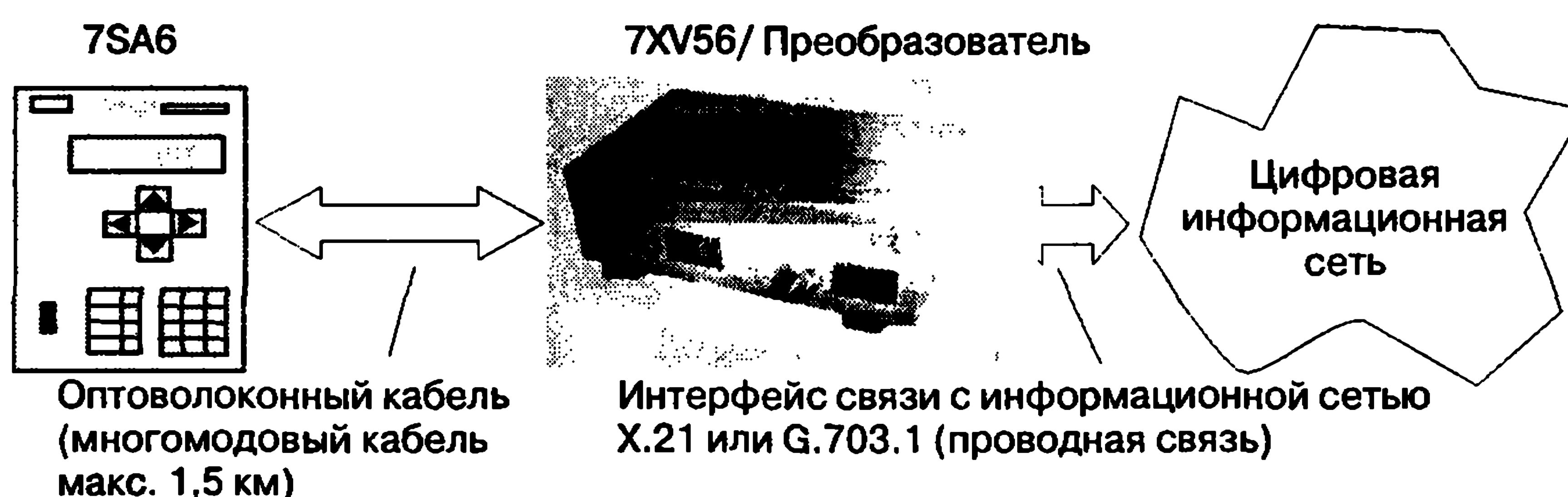


Рис. 4.5. Передача данных защиты по информационной сети

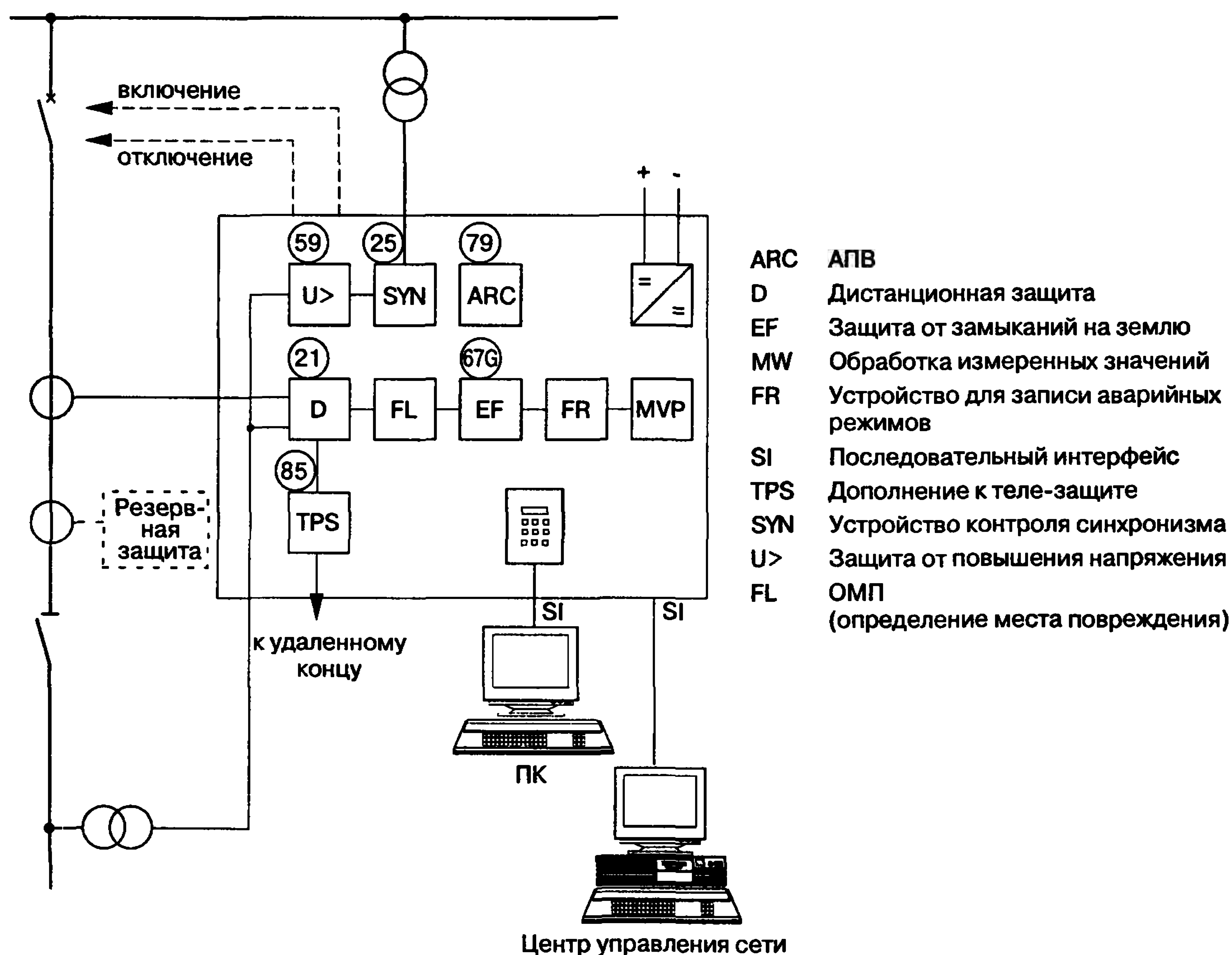


Рис. 4.6. Цифровая защита линии, интегрированные функции

Полная схема защиты может быть полностью сконфигурирована с помощью специальной программы для работы с устройством (DIGSI). Функции могут быть выбраны из меню защиты. Набор интегрированных функций обеспечивает широкую область применения терминала и соответствует основным направлениям развития практики релейной защиты во всём мире.

Энергетическими предприятиями, как правило, будет использоваться один тип терминалов для всех применений (например, линий и кабелей). Характеристики срабатывания ступеней (окружность для длинных линий и многоугольник для коротких воздушных линий и кабелей) выбираются при параметрировании. Вспомогательные функции (например, АПВ для ВЛ и защита от перегрузки для кабелей) могут быть выбраны из функционального меню.

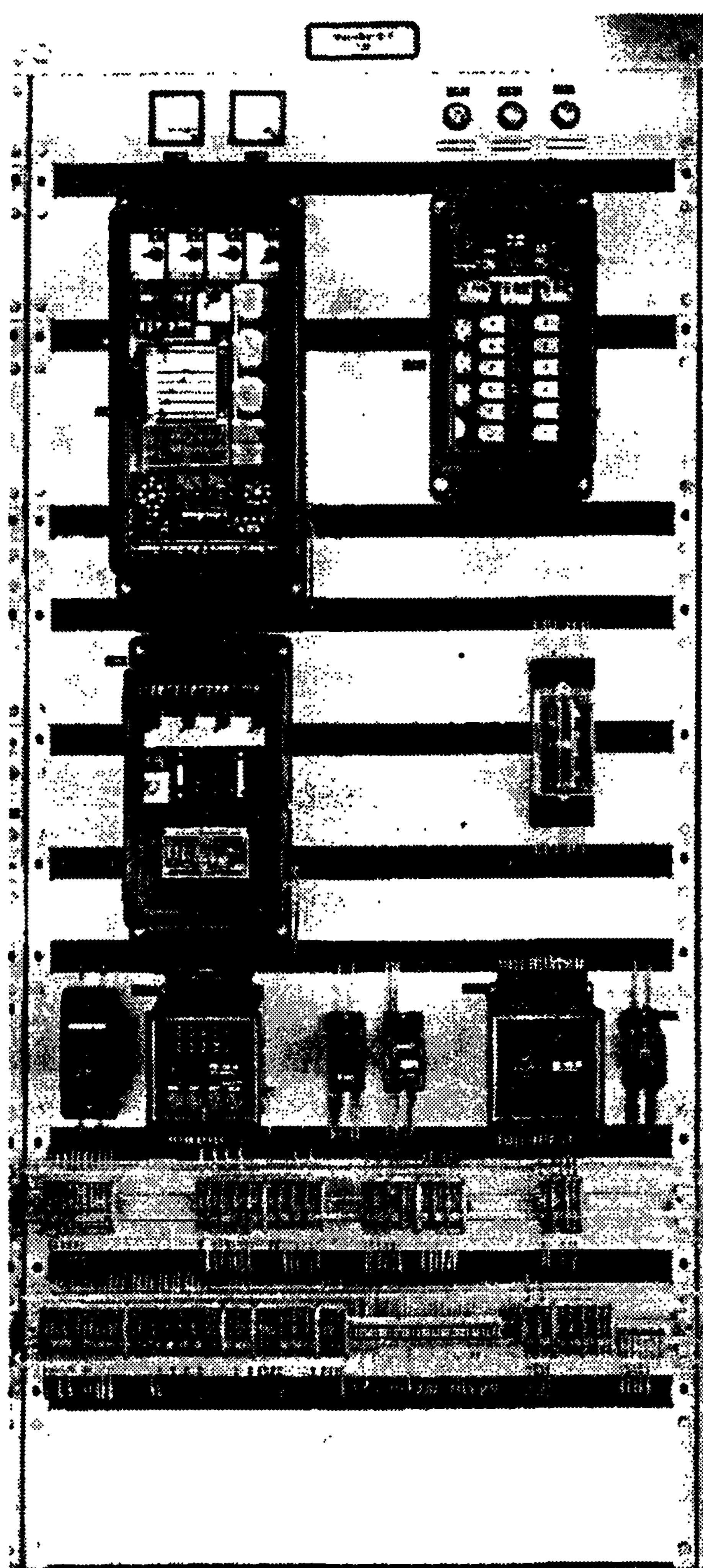
Логические сигналы защиты (пуск, отключение и т.д.) могут быть «привязаны» к интерфейсам терминала (реле отключения и сигнализации, диоды, последовательные интерфейсы) с помощью таблицы ранжирования программы DIGSI.

На практике часто необходимы специальные функции (логическое объединение сигналов, выдержка времени и т. д.) для адаптации схемы защиты к конкретному применению, например, для координации отключения и АПВ выключателя

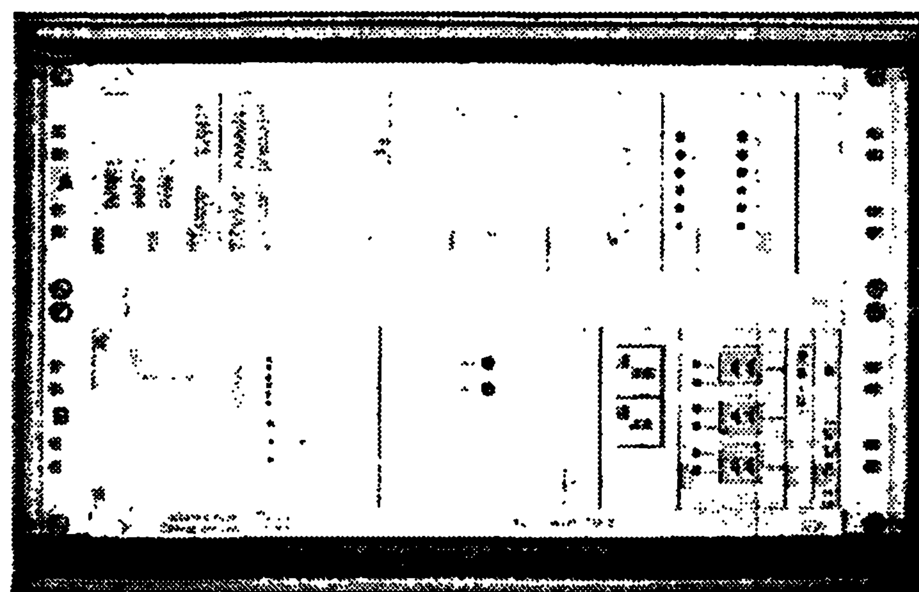
при полуторной схеме РУ (в прошлом для этих целей использовались специальные внешние реле и цепи). В реле серии SIPROTEC 4 есть возможность создания дополнительных пользовательских функций. Сигналы с дискретных входов и внутренние сигналы (пороговые датчики, сигналы защиты) могут быть связаны, логически обработаны и переданы на выходные реле и выходы сигнализации. Логические схемы описываются в графическом CFC редакторе (CFC — программируемая функциональная логика). Таким образом, установка отдельных устройств на панели и соединение их между собой проводами заменяется конфигурированием и параметризацией (заданием параметров) с помощью ПК.

Это позволяет значительно уменьшить размеры панелей и шкафов защиты.

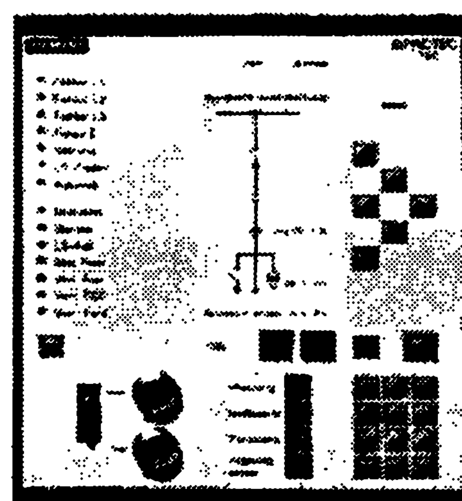
Место, занимаемое отдельными устройствами на панели защиты либо целым шкафом, сокращается до размеров одного корпуса терминала (рис. 4.7).



Электромеханическая защита



Аналогово-статическая



Цифровая

Рис. 4.7. Развитие устройств защиты (на примере защиты ВЛ110 кВ)

В большинстве случаев одного терминала на одном конце линии достаточно для выполнения всех функций защиты. Для аппаратного резервирования функции резервных защит должны выполняться отдельным терминалом (см. концепцию защиты 5.3.2).

Минимизация места и количества соединений между устройствами позволяет значительно снизить стоимость установки панели и её тестирования и уменьшить площадь, занимаемую щитом управления на подстанции.

С другой стороны, из-за введения дополнительных интегрированных функций увеличилось число уставок защиты.Поэтому для упрощения наладки должен использоваться стандартизованный набор основных параметров, который будет копироваться в новые терминалы. Объём параметрирования новых устройств в этом случае сократится до внесения только тех параметров, которые характерны для данного конкретного применения (например, параметры линии).

В табл. 4.2 приведены функции, выполняемые современными дистанционными защитами серии SIPROTEC 4:

Таблица 4.2

Интегрированные функции

Функции	Реле 7SA522	Реле 7SA 6xx
Основные функции		
Дистанционная защита 21	полная схема	
Характеристика срабатывания	Четырёхугольник, окружность	Четырёхугольник, окружность со смещением
Память напряжения	2 с	
Минимальное время отключения	Обычное: 17мс (50Гц),15мс (60Гц) С быстродействующими выходными реле:12мс (50Гц), 10мс (60Гц)	
Ступени защиты	6 (все с независимым выбором направления)	
Уставки ступеней	0,05—600 Ом (1 А)	
	0,01—120 Ом (5 А)	
Зона блокирования нагрузки: сопротивление нагрузки, угол нагрузки	0,1—600 Ом (1 А) 0,02—120 Ом (5 А) 20—60 градусов	
Компенсация токов замыкания на землю: уставка R_E/R_L и X_E/X_L или уставка K_0 и φ_0	от 0,33 до 7,00 от 0,00 до 4,00 и −135—+135 градусов	
Способы телеуправления 85-21	DUTT, PUTT, POTT, блокирование и деблокирование, дополнительная функция отключения при слабом питании	

Продолжение табл. 4.2

Функции	Реле 7SA522	Реле 7SA 6xx
Блокировка при качаниях/ отключение при качаниях 68/68T	Без уставки, эффективно для качаний с частотой до 7Гц	
Число групп уставок	4 независимых группы уставок, переключаемые с помощью клавиатуры терминала, последовательных интерфейсов или дискретных входов	
Дополнительные функции защиты:		
Направленная и ненаправленная защита от КЗ на землю 50N, 51N, 67N	Заземлённая нейтраль: U_0, I_0 или U_2 направленная; зависимая и независимая выдержки времени	Изолированная нейтраль: измерение $U \cdot I \cdot \sin\varphi$ Сети с компенсированной нейтралью: измерение $U \cdot I \cdot \cos\varphi$ Заземлённая нейтраль: U_0, I_0 или U_2 направленная; зависимая и независимая выдержки времени
Сравнение направлений при замыканиях на землю 85-67N	Отключение, блокировка	
Резервная токовая защита 51,51N	Зависимая и независимая выдержка времени	
Защита от перенапряжения 59	$U_ф >$, $U_0 >$, $U_1 >$ Опция: вычисление напряжения на удалённом конце отключённой линии, компенсация ёмкостного эффекта (эффекта Ferranti)	
Защита от понижения напряжения 27	U <, U < <	
Защита от повышения/понижения частоты 81	4 ступени	
Тепловая перегрузка 49	—	в соответствии с IEC 60255-8
Защита от отказа выключателя (УРОВ) 50BF	Пофазная	
Защита от включения на повреждение 50HS	Время отключения: 13 мс, 8 мс с быстродействующими выходными реле	
АПВ 79	ТАПВ, ОАПВ, однократное и многократное	
Контроль синхронизма 25	Режимы: контроль синхронизма ΔU, $\Delta\varphi$, Δf; наличия (отсутствия) напряжений	

Продолжение табл. 4.2

Функции	Реле 7SA522	Реле 7SA 6xx
Другие дополнительные функции:		
Регистрация аварийных событий	8 записей, 600 событий	
Регистрация режимов повреждений	8 записей, общее время: 15 с, с частотой дискретизации 1 мс при питании от батареи	
Измерение электрических величин в нагрузочном режиме	Токи фаз I_A, I_B, I_C, I_E Симметричные составляющие токов I_1, I_2, I_0 Напряжения U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} Симметричные составляющие напряжений U_1, U_2, U_0 Измерение сопротивлений нагрузки *X*, *R* Мощность (полная, активная, реактивная) Энергия (активная, реактивная) Усреднение значений за длительный период (*I*, *S*, *P*, *Q*)	
Программируемые логические функции	Программирование с помощью графического редактора CFC программы DIGSI	
Выходные реле (отключающие и сигнальные)	16, 24 или 32	Все входы и выходы устройства, а также светодиоды свободно программируются
Дискретные входы	8, 16 или 24	
Светодиоды	мах 30	

Устройства с комбинированными функциями защиты и управления

Увеличившаяся мощность микропроцессоров позволила интегрировать функции измерения, управления и автоматизации в терминалы защиты.

На лицевой панели устройств с комбинированными функциями защиты и управления находятся ключи управления и графический жидкокристаллический дисплей. Это позволяет осуществлять управление устройством с лицевой панели терминала и отображать на ней информацию. На дисплее может отображаться мнемосхема распредустройства, измеряемые значения и список событий. Схема управления может быть сконфигурирована в DIGSI так, чтобы отвечать всем требованиям пользователей.

Блокировки и пользовательские функции могут быть описаны с помощью графического редактора CFC (свободно программируемая логика). Управление может выполняться с помощью курсора и кнопок управления (включения/отключения).

Таким образом, в распределительных сетях вполне достаточно одного устройства для защиты и управления присоединением (концепция «одна ячейка, один терминал», рис. 4.8).



Рис. 4.8. Общий вид панелей с установкой цифровых защит

4.5. Подключение микропроцессорных устройств

Подключение устройств к измерительным трансформаторам, источникам питания, а также к цепям отключения и сигнализации производится обычным способом, т.е. как и в случае электромеханических или статических реле (рис. 4.9). В результате интегрированных дополнительных функций на панели устройства находится намного больше входных и выходных зажимов по сравнению с классической панелью защиты.

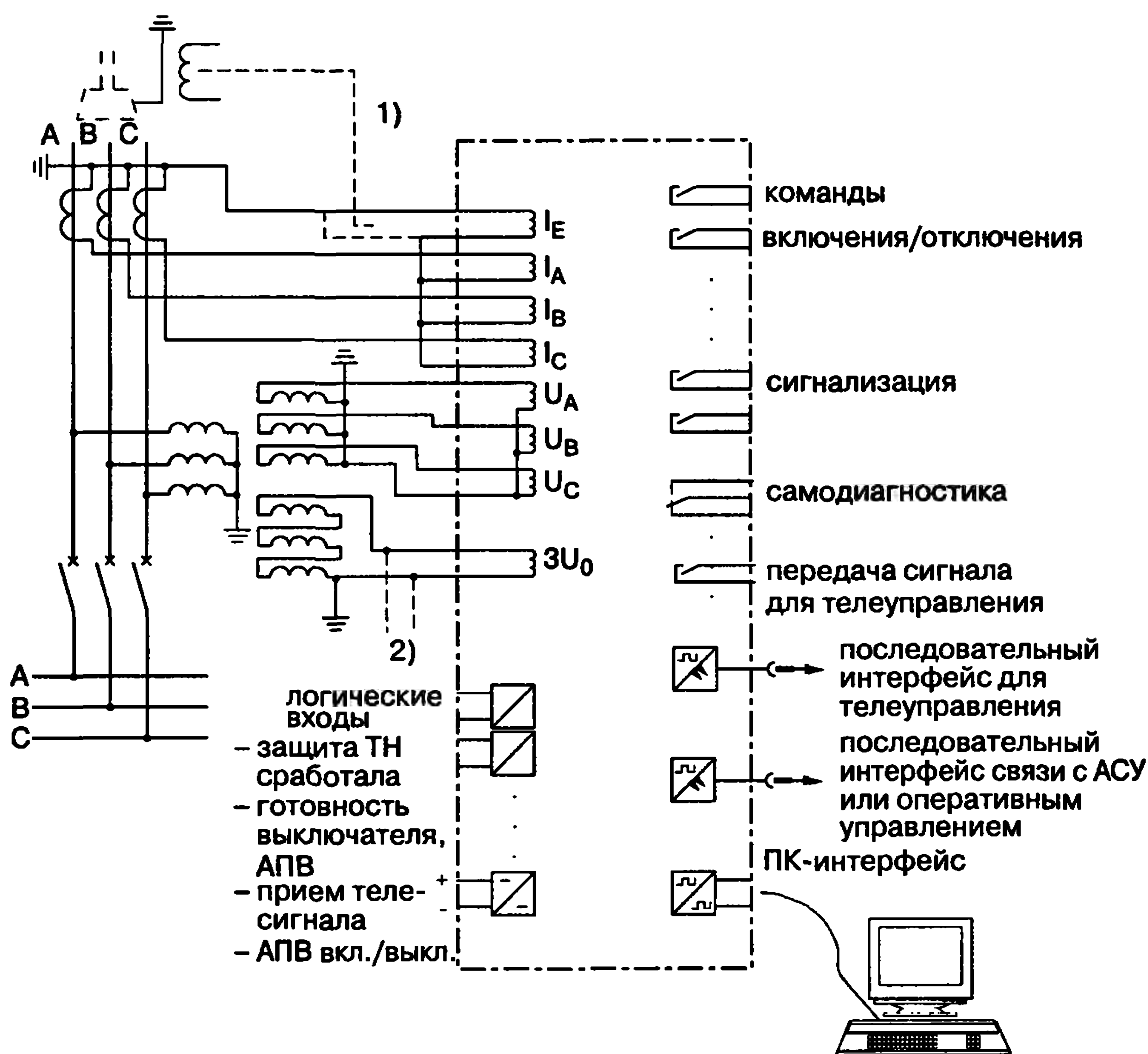
Используются новые последовательные каналы связи. Предпочтительнее использование оптоволокна, которое гарантирует абсолютную защиту от помех.

Большое количество сигнальных выводов необходимо только для отдельно расположенных защит. Если реле входит в общую систему управления подстанции, сигнальные выводы в большинстве случаев не используются, т. к. данные о событиях, сообщения, аварийные сигналы передаются через последовательные соединения.

Подключение к трансформаторам тока

В системах с заземлением осуществляется подключение к ТТ, установленным в трех фазах. Вход тока нулевой последовательности устройства подключается к нулевой точке соединенных в звезду вторичных обмоток ТТ.

В реле 7SA6 ток нулевой последовательности для дистанционной защиты вычисляется по значениям фазных токов. Вход I_E может быть использован для осу-



1) возможное подключение ТТ с кольцевым сердечником для повышения чувствительности при определении замыкания на землю в системах с изолированной или компенсированной нейтралью, при этом ток I_E для дистанционной защиты вычисляется

2) возможное подключение к ТН на шинах для выполнения функции синхронизации. При этом значение U_{EN} для определения замыканий на землю вычисляется

Рис. 4.9. Назначение и подключение выводов реле 7SA610 цифровой дистанционной защиты

ществления компенсации влияния параллельной линии (для подключения к цепям тока нулевой последовательности параллельной линии).

В системах с изолированной/компенсированной нейтралью используется реле 7SA6 с интегрированной функцией определения направления замыкания на землю. В этом случае к чувствительному входу тока нулевой последовательности I_E подключается выход высокочувствительного трансформатора тока с тороидальным сердечником и небольшим коэффициентом трансформации (60/1 в случае 7XR96) (рис. 4.10). Ток нулевой последовательности для дистанционных измерений при двойных замыканиях на землю вычисляется по фазным токам.

Иногда в небольших сетях без заземления, где двойные замыкания на землю встречаются редко, трансформаторы тока устанавливались только в двух фазах — А и С. Это часто сочеталось с использованием только двух трансформаторов на-

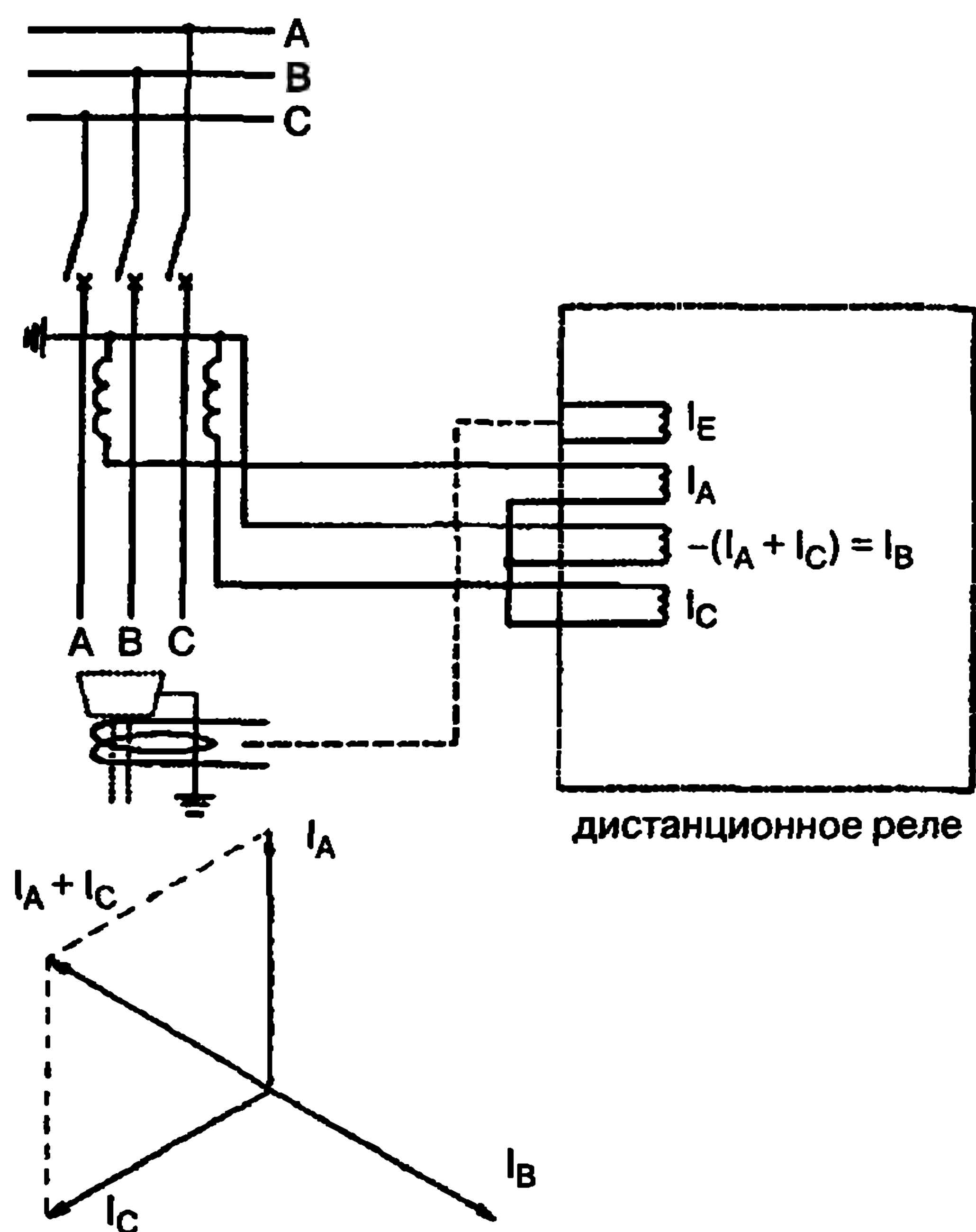


Рис. 4.10. Схема подключения дистанционной защиты к двум трансформаторам тока (вход I_E используется для подключения к специальному ТТ для чувствительной защиты от замыкания на землю)

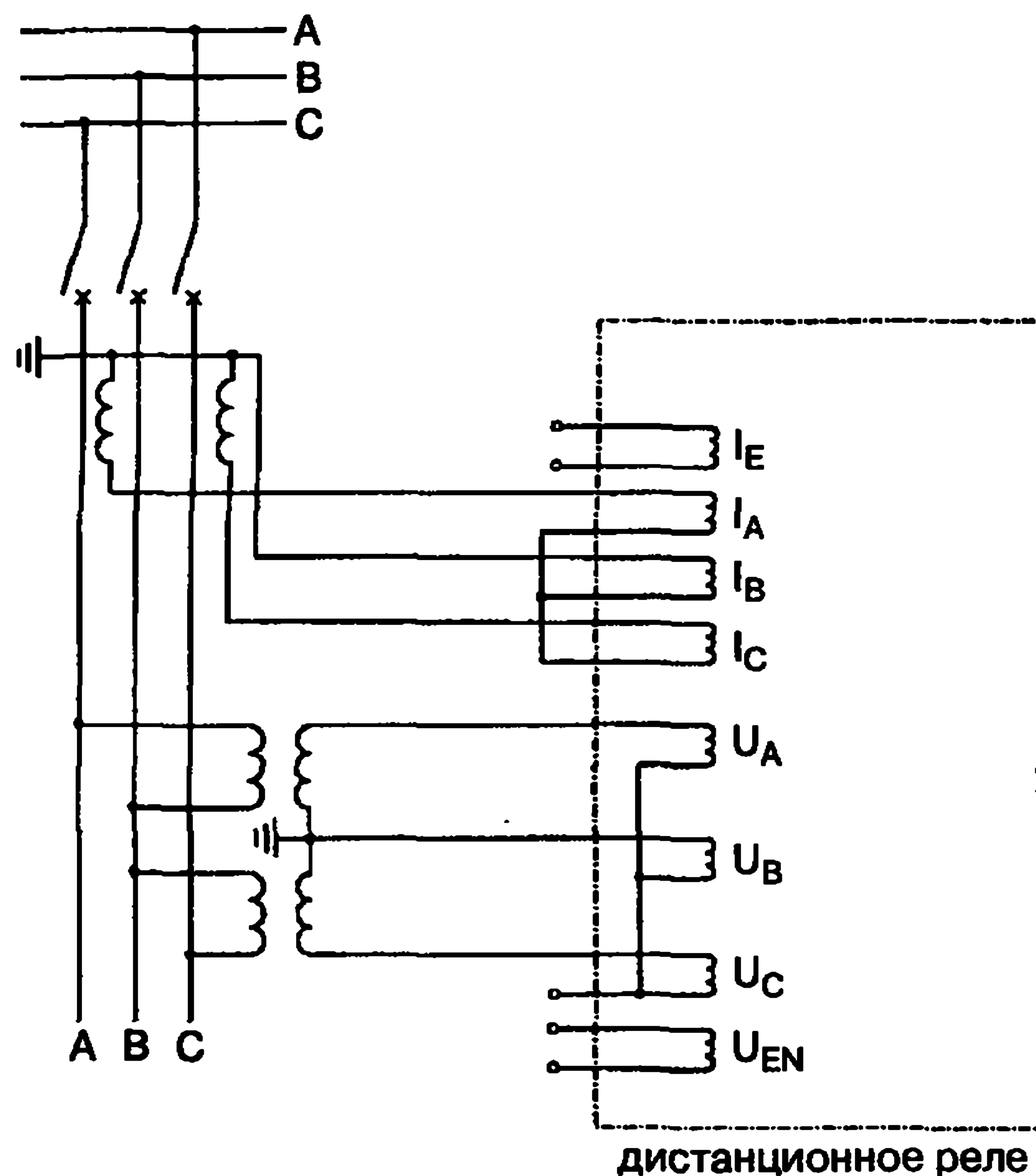


Рис. 4.11. Подключение дистанционной защиты к двум трансформаторам напряжения по схеме открытого треугольника

пряжения, вторичные обмотки которых соединяются по схеме открытого треугольника (см. рис. 4.11). Токовый вход фазы B включается в обратный провод на сумму токов фаз A и C.

При междуфазных КЗ данная экономичная схема позволяет верно определить токи короткого замыкания. Однако, двойные замыкания на землю всегда рассматриваются и измеряются как простые двухфазные. В зависимости от расположения точки замыкания относительно реле возможно получение различных значений сопротивления. При этом невозможно выявить именно двойное замыкание на землю.

Описанное устройство и схема подключения его входов представлены в руководстве по использованию 7SA6.

Подключение к трансформаторам напряжения

В системах с заземлением нейтрали дистанционные реле должны быть подключены к трёхфазному трансформатору напряжения. Дополнительное соединение обмоток ТН по схеме разомкнутого треугольника не требуется для дистанционной защиты, но является желательным для выполнения функции контроля цепей трансформатора напряжения ($\underline{U}_{EN} = \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C$).

В отдельных случаях напряжение смещения $\underline{U}_{EN}$ ($3U_0$) может быть получено с помощью дополнительных трансформаторов напряжения со схемой соединения Y/разомкнутый треугольник.

В системах с изолированной/компенсированной нейтралью обычно также исполь-

зуются трёхфазные трансформаторы напряжения и, следовательно, расстояние до места замыкания на землю определяется правильно. Более того, это единственный способ получения напряжения нулевой последовательности для определения направления замыкания на землю.

Однако, если достаточно определения правильного расстояния только при простых двухфазных и трёхфазных КЗ без земли, можно использовать 2 трансформатора напряжения с соединением обмоток по схеме открытого треугольника. Нейтральная точка звезды не подключается к соответствующему реле и поэтому всегда располагается в центре треугольника линейных напряжений. При этом трансформируются только составляющие напряжения прямой и обратной последовательности.

При двойных замыканиях на землю измеренное сопротивление оказывается слишком большим, так как напряжение нулевой последовательности не определяется при данной схеме соединения обмоток трансформатора.

Соединение обмоток трансформаторов напряжения по схеме открытого треугольника может быть использовано в сочетании с подключением только двух трансформаторов тока (см. рис. 4.11).

Такую экономичную схему можно обнаружить только в старых установках, используемых в небольших сетях.

4.6. Обслуживание устройства

Клавиатура и буквенно-цифровой дисплей расположены на передней панели устройства.

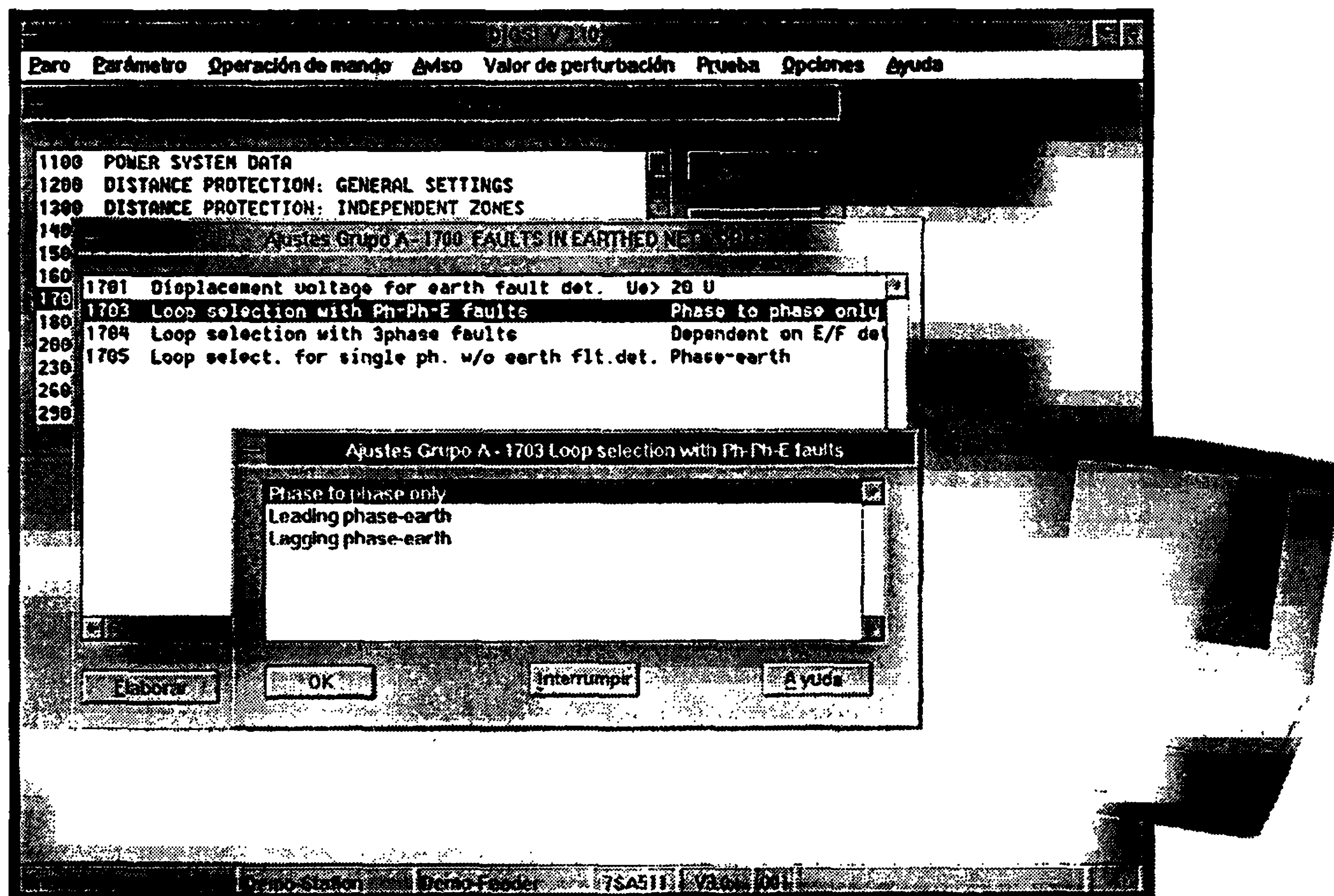


Рис. 4.12. Использование программы DIGSI для работы с устройством защиты

Управление производится в режиме меню. Уставки могут вводиться непосредственно в цифровой форме. Информация даётся в текстовом поле.

На четырехстрочный дисплей выводятся измеренные значения в нормальном режиме работы (например, выбранные токи и напряжения). В случае замыкания на дисплей автоматически выводятся данные об определенном повреждении (например, тип замыкания и место замыкания).

Последовательный интерфейс (RS232) для связи с ПК (интерфейс обслуживания) также расположен на передней панели устройства.

С помощью программы DIGSI, работа с которой аналогична работе с приложениями Windows, защита может быть сконфигурирована и параметрирована (рис. 4.12)

Возможно также считывание уставок и данных о режиме повреждения из устройства.

Уставки обычно подготавливаются в режиме off-line инженерами-релейщиками вне объекта, а на объекте они загружаются в устройство с переносного компьютера.

Считывание уставок и данных о режиме повреждения возможно также через модемные связи. Программа DIGSI имеет приложение (программа SIGRA) для анализа аварийных режимов. Она позволяет

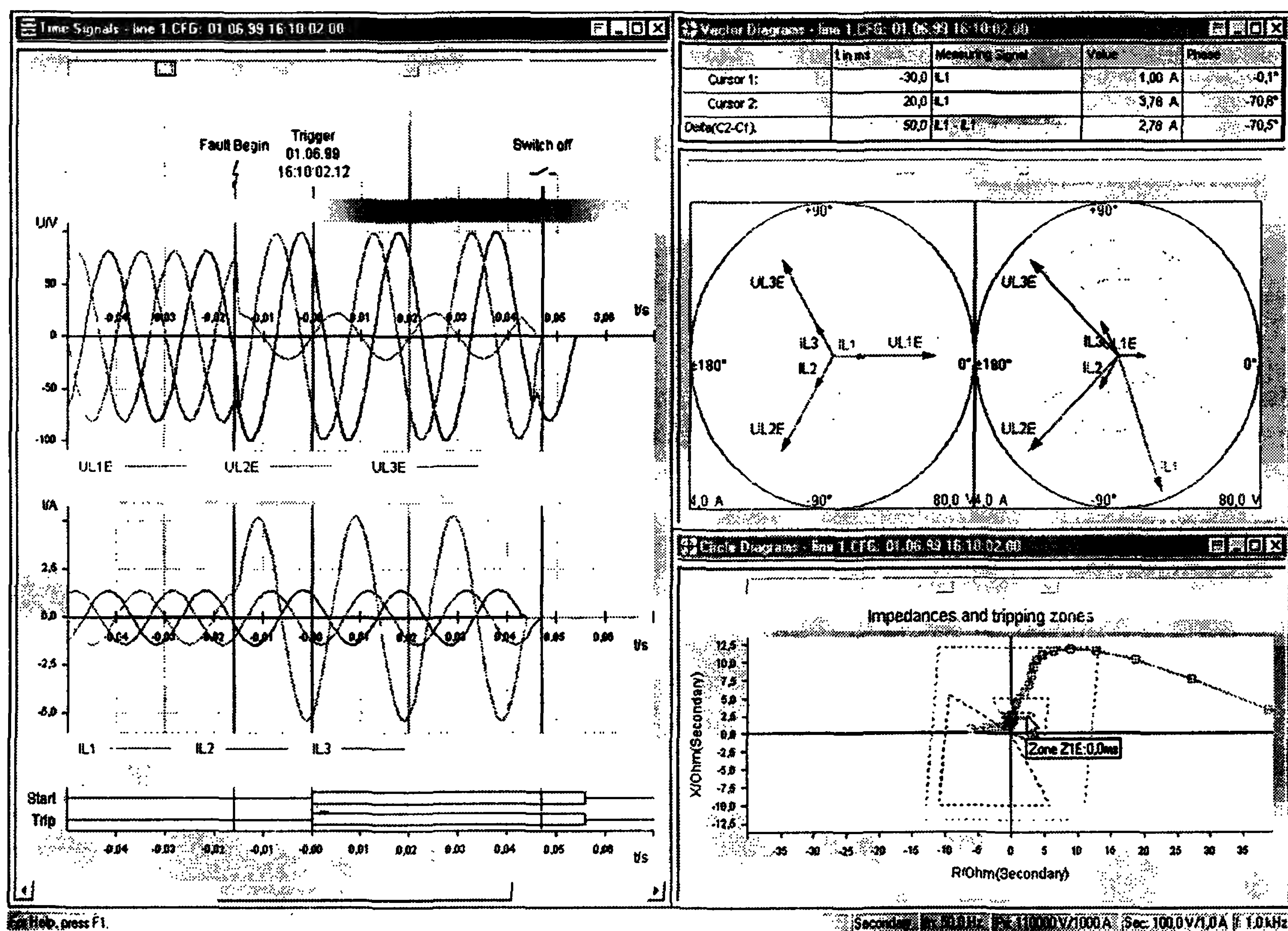


Рис. 4.13. Анализ записи режима повреждения с использованием приложения SIGRA

отобразить на дисплее и проанализировать записи аварийного режима, считанные из терминала. Они включают в себя временные и векторные диаграммы всех токов и напряжений. Дополнительно могут быть получены и представлены в векторной форме соответствующие симметричные составляющие. Также могут быть импортированы и синхронизированы с уже имеющимися данные с удаленного конца линии. Таким образом может быть проверена работа защиты с телеуправлением.

Для дистанционной защиты программа позволяет выполнить расчет сопротивлений шести контуров (A-E, B-E, C-E, A-B, B-C, C-A) с помощью преобразования Фурье на интервале наблюдения, равном одному периоду. Начало интервала может перемещаться по осциллограмме с помощью курсора с шагом в 1 мс. Таким образом, может быть рассчитана траектория изменения сопротивления на интервале от момента возникновения повреждения до его отключения (рис. 4.13).

5. Применение

Сначала рассматриваются общие положения практического использования дистанционных защит. Затем в деталях будут рассмотрены типичные области применения.

5.1. Общие положения

5.1.1. Критерии применения

Классические дистанционные защиты без каналов связи могут быть использованы на всех типах установок, где обеспечивается минимальное сопротивление для определения уставок.

В первую очередь это воздушные линии и кабели минимальной длины.

Поскольку генераторы, трансформаторы и компенсирующие реакторы обладают достаточно высоким сопротивлением короткого замыкания, то возможно обеспечение селективного отключения.

Ещё одним условием является возможность установки соответствующих трансформаторов тока и напряжения в месте установки реле.

Трансформаторы тока должны располагаться на защищаемой линии после источника питания.

Возможно расположение как перед выключателем, так и после него.

Если имеется только один блок трансформаторов, то более предпочтительным является его расположение на стороне линии. В этом случае выключатель не находится в зоне прямого действия защиты.

В США трансформаторы тока помещают по обе стороны выключателя для того, чтобы получить перекрывающиеся зоны защиты. В этом случае дистанционная защита линии подключается к трансформаторам тока на стороне шин, при этом выключатель оказывается внутри защищаемой зоны.

В сетях высокого и сверхвысокого напряжения трансформаторы напряжения обычно устанавливаются на каждой линии. Измеряемое напряжение, однако, может быть получено и от шин или других линий, которые гальванически связаны с защищаемой линией. Это характерно для систем среднего напряжения. При наличии нескольких систем шин (или секционировании) необходимо использование специальных схем защиты для обеспечения селективного отключения.

На очень коротких линиях или кабелях полное сопротивление короткого замыкания может быть слишком маленьким для формирования уставки. В этом случае дистанционная защита может быть выполнена только по схеме сравнения направлений с использованием ступеней с полным охватом защищаемой зоны (см. п.п. 3.1.10). В некоторых случаях дистанционная защита со сравнением направлений может быть использована в качестве защиты шин. Для этого одна из ступеней дистанционных защит на каждой линии имеет обратную направленность. Сравнение направлений для всех линий осуществляется с помощью дополнительной логической схемы.

5.1.2. Минимальная длина линии

Минимальная уставка вторичного полного сопротивления цифровой дистанционной защиты 7SA составляет X_{pmin} = = 0,05 Ом при номинальном вторичном

токе 1А. Соответственно, при номинальном токе в 5А, $X_{p\,\min} = 0{,}01$ Ом.

Зона досягаемости (срабатывания) цифровых реле с четырехугольными характеристиками определяется реактивным сопротивлением. Для оценки минимально возможной длины линии при защите ее первой ступенью используется выражение

$$X_{линии\,\min} = \frac{K_U}{K_I} X_{p\,\min} \frac{1}{K_{отс1}}, \qquad (5.1)$$

где $K_{отс1}$ — коэффициент отстройки для первой ступени (например, 0,85); K_U, K_I — коэффициенты трансформации ТН и ТТ, соответственно.

Минимальная длина защищаемой линии:

$$l_{L\,\min} = \frac{X_{линии\,\min}}{X'_L}, \qquad (5.2)$$

где X'_L — удельное сопротивление линии, Ом/км.

<u>Пример 5.1</u>

Задано:

10 кВ бронированный кабель сечением 240 мм^2, $X'_L = 0{,}09$ Ом/км

трансформатор тока 400/5 А;

трансформатор напряжения 10 000/100 В;

$$X_{линии\,\min} = \frac{10000/100}{400/5} 0{,}01 \frac{1}{0{,}85} = 0{,}015 \text{ Ом},$$

$$l_{L\,\min} = \frac{0{,}015}{0{,}09} = 0{,}167 \text{ км}.$$

Полученный результат говорит о том, что цифровые дистанционные реле могут быть использованы на очень коротких линиях.

Однако необходимо заметить, что точность измерений существенно снижается в случае крайне низких напряжений.

Для того чтобы погрешность измерений не превышала 10 %, вторичное напряжение короткого замыкания «на зажимах» реле, т. е. падение напряжения на реактивном сопротивлении, не должно быть ниже 1 В.

Минимальный ток короткого замыкания при этом

$$I_{КЗ\,\min} = \frac{U_{КЗ\,\min}}{X_{линии\,\min}}. \qquad (5.3)$$

В рассмотренном примере

$$I_{КЗ\,\min} = \frac{1 \cdot \frac{10000}{100}}{0{,}015} = 6670 \text{ А}.$$

Для сетей с ограничением тока при замыканиях на землю минимальная длина линии, которая может быть защищена дистанционной защитой, соответственно, увеличивается.

Учитывая падение напряжения на реактивном сопротивлении земли, получаем следующее выражение:

$$I_{КЗ\,\min} = \frac{U_{КЗ\,\min} \cdot K_U}{X_{линии\,\min} \cdot \left(1 + \frac{X_E}{X_L}\right)} \qquad (5.4)$$

откуда

$$X_{линии\,\min} = \frac{U_{КЗ\,\min} \cdot K_U}{I_{КЗ\,\min} \cdot \left(1 + \frac{X_E}{X_L}\right)}. \qquad (5.5)$$

Принимая $X_E/X_L = 0{,}4$, а ток нулевой последовательности равным 2000 А, получаем следующие результаты:

$$X_{линии\,\min} = \frac{1 \cdot \frac{10000}{100}}{2000 \cdot (1 + 0{,}4)} = 0{,}036 \text{ Ом}$$

и

$$l_{L\,\min} = \frac{0{,}036}{0{,}09} = 0{,}4 \text{ км}.$$

Это означает, что в данном случае определяющим является не минимальная уставка реле, а минимальное необходимое напряжение короткого замыкания.

5.1.3. Время отключения

В устойчивых сетях, например, таких как в Германии, не требуются чрезвычайно маленькие времена отключения. В общем случае достаточно 100мс (время срабатывания защиты + время отключения выключателя) для нормального отключения короткого замыкания.

В Германии приняты следующие требования к времени отключения линий при возникновении близких трёхфазных КЗ:

Системы сверх высокого напряжения (СВН)	25 мс.
Системы высокого напряжения (ВН)	30 мс.
Системы среднего напряжения (СН)	40 мс.

Времена срабатывания цифровых реле значительно ниже (см. табл. 4.2).

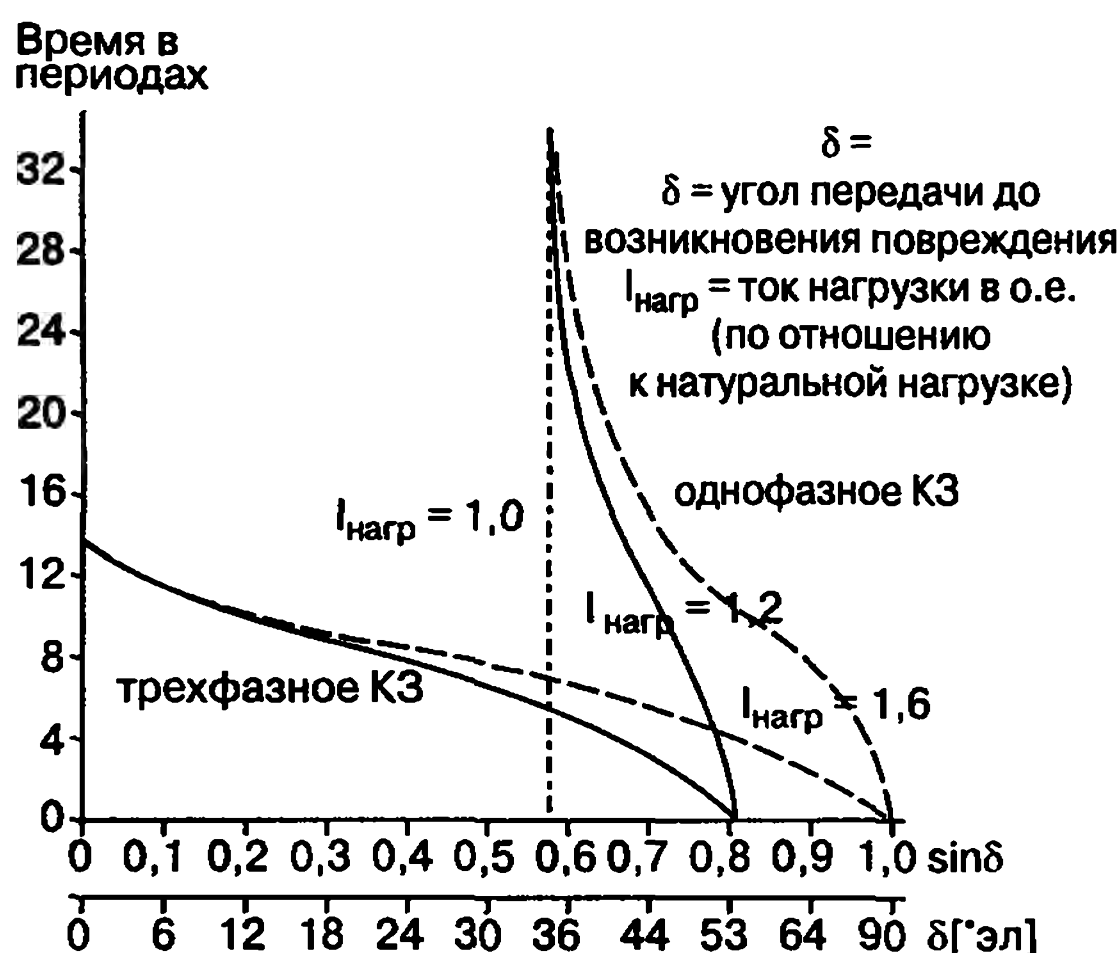


Рис. 5.1. Критическое время отключения замыкания [5.2]

В магистральных системах с длинными, сильно нагруженными линиями при возникновении замыканий велика вероятность потери устойчивости. Поэтому, быстрое отключение необходимо на 100 % длины линии (рис. 5.1). Наиболее распространенным является требование отключения замыкания в течение 4 периодов основной частоты (80мс при $f_{ном}$ = 50 Гц), из которых 2 периода относятся ко времени срабатывания защиты, а 2 оставшихся — ко времени отключения выключателя.

Осуществить быстрое отключение на 100 % длины линии представляется возможным только при использовании канала обмена данными между реле на разных концах линии. При этом промежуток времени в 2 периода включает в себя время передачи данных, а также время, требующееся для работы реле при передаче и получении сигнала. При использовании высокочастотной связи по ЛЭП или радио-каналов максимальная задержка при передаче сигналов не должна составлять более 20мс. На срабатывание дистанционного реле остаётся не более одного периода (20 мс). При использовании оптоволоконных каналов связи передача сигнала происходит в более короткое время — около 10 мс.

Адаптивная измерительная техника

В цифровых дистанционных защитах используется адаптивный алгоритм, позволяющий осуществить быстрое отключение замыканий, которые находятся внутри защищаемой зоны (0—80 % уставки) (рис. 5.2). В то же самое время использование более длительного промежутка времени для снятия данных и двух независимых систем измерений обеспечивает высокую точность измерений в случае замыканий, близких к концу защищаемой зоны (рис. 5.3).



Рис. 5.2. Время срабатывания адаптированного устройства

Для защит сверхвысокого напряжения, например 7SA522, получаем следующие результаты:

Благодаря перекрытию зон действия ступеней, не имеющих замедления, в случае передачи разрешающего сигнала для ступеней с неполным охватом, один конец линии всегда отключается за очень короткое время (обычно 17 мс при 50 Гц). На противоположном конце команда отключения подаётся после получения сигнала с противоположного конца в течение времени, не превышающего 40 мс.

При использовании схем сравнения направлений и ступени с полным охватом (разрешающий сигнал для ступени с полным охватом, блокировка, деблокировка), зона излишнего охвата должна быть достаточно большой для того, чтобы вся длина линии могла быть отключена быстродействующей ступенью, т. е. приблизительно составлять 100/0,75 = 130 %.

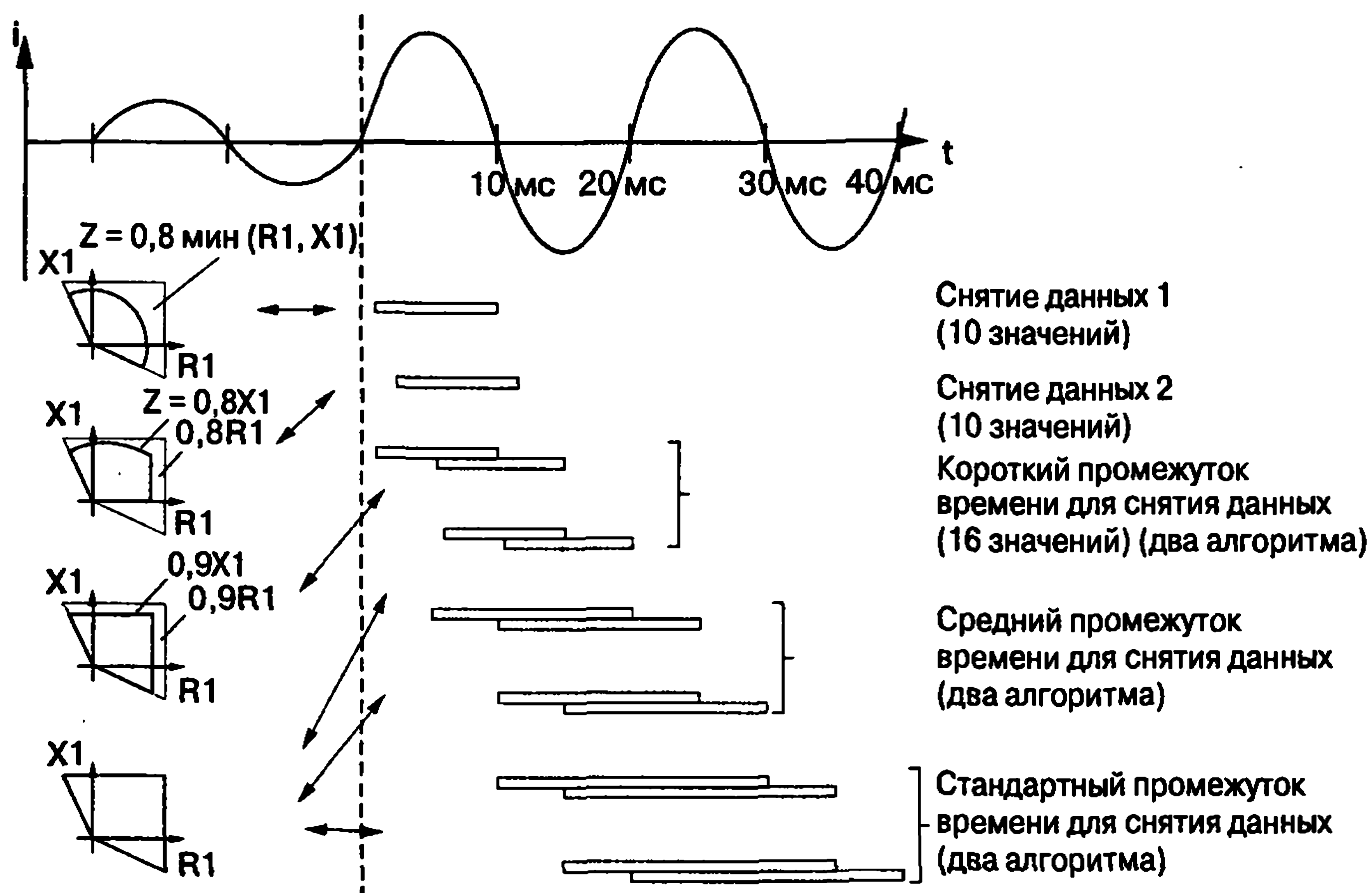


Рис. 5.3. Адаптируемое устройство дистанционной защиты

5.1.4. Защита с использованием канала связи, выбор способа управления

В Европе использовались и до сих пор используются схемы с передачей разрешающего сигнала. В США практически всегда использовались только схемы с блокировкой (сравнение направлений).

На развитие этих направлений в прошлом сильно повлияли особые характеристики PLC-технологии[18].

Высокочастотная связь с амплитудной модуляцией и прямой манипуляцией ВЧ — сигналом (передача сигнала включения/отключения), широко использовавшаяся в США, обеспечивает быстрый (<5 мс) способ передачи сигнала, но плохо защищена от помех, поэтому передача блокирующего сигнала в этом случае подходит лучше всего.

Каналы для передачи звуковых частот с фазо-частотной манипуляцией, которые в основном используются в Европе, более защищены от электромагнитных помех (вспышки молнии, короткие замыкания, коммутации). Однако процесс передачи данных по ним и их распознавания несколько более длительный (15—20 мс). Такие каналы хорошо подходят для схем с передачей разрешающего сигнала для ступеней с неполным охватом, а также для ступеней с охватом всего участка (сравнение направлений). Однако, в любом случае, канал передачи должен быть отделён от защищаемой линии (э/м связь с параллельной линией или между двумя системами).

Область применения схем с разрешающим сигналом сужается, если PLC-сигнал передаётся непосредственно по защищаемой линии (параллельного пути нет). При многофазных замыканиях, близких к концу защищаемой линии, возможно сильное затухание сигнала.

Соответственно, схемы с передачей разрешающего сигнала для ступеней с неполным охватом или для ступеней с полным охватом защищаемого участка можно использовать только в том случае, если при существенном ослаблении сигнала вторая ступень достаточно чувствительна при замыканиях, близких к удалённому концу.

Схемы с блокировкой лучше подходят в этом случае, т. к. защита действует на отключение при возникновении замыканий на линии и при поврежденном канале передачи.

Схема деблокировки сочетает в себе схему с передачей разрешающего сигнала для ступени с излишним охватом и схему блокировки.

В общем случае при замыканиях на линии ступень с излишним охватом может сработать, если частота сигнала, приходящего с противоположного конца, сменилась с контрольной на разрешающую (в случае сигнала деблокировки). Если канал передачи сигнала оказался повреждённым, а защитой было обнаружено замыкание, то это рассматривается как ослабление сигнала из-за повреждения линии, и срабатывание защиты снова разрешается.

Поэтому способ деблокировки удобен в том случае, если разрешающий сигнал должен передаваться по защищаемой линии. Этот способ, по сравнению со способом блокировки, имеет то преимущество, что позволяет осуществлять постоянный контроль состояния канала передачи при помощи опрашивающего сигнала. При этом необходимо передавать по ВЧ-кана-

[18] PLC- аббревиатура способа передачи сигнала с помощью несущей частоты в канале высокочастотной связи по ЛЭП.

лу сигналы звуковой частоты с фазочастотной манипуляцией.

Радиосвязь в микроволновом диапазоне может использоваться как для схем с передачей разрешающего сигнала для ступени с неполным охватом, так и для схем с блокировкой.

В случае применения оптоволоконных соединений обычно используется схема с передачей разрешающего сигнала, т. к. этот способ связи является быстрым и надёжным.

В городских кабельных сетях часто можно использовать контрольные провода (каналы управления и телефонные провода). Тогда с помощью контрольных проводов можно строить схемы сравнения. В табл. 5.1 представлены основные критерии для выбора каналов передачи данных.

Таблица 5.1

Дистанционная защита с каналом связи, сравнение различных схем

		Передача разрешающего сигнала для ступени с неполным охватом и расширением зоны защиты	***Передача разрешающего сигнала для ступени с полным охватом***	***Блокировка***	***Деблокировка***
наиболее подходящий способ применения	***передача сигнала***	Надежный канал передачи сигнала **PLC с фазо-частотной манипуляцией** , межсхемная связь в случае параллельных линий , наилучший способ передачи — по отдельной линии для того, чтобы избежать передачи сигнала через место повреждения. **Радио-каналы с микроволновым диапазоном частот**, особенно, цифровые (PCM). **Оптоволоконный канал**		канал с высокой надежностью (используется при внешних коротких замыканиях) **PLC с амплитудной модуляцией,** допустима однофазная связь с защищаемой цепью (разрешается использование одной и той же частоты для всех концов линии)	Только при использовании **каналов звуковой частоты и фазо-частотной манипуляции**
	конфигурация линии	Обычно используется на **линиях средней длины и длинных линиях** (на коротких линиях только с четырехугольными характеристиками при небольших переходных сопротивлениях)	**Короткие линии,** особенно, если ожидаются большие переходные сопротивления. Т-образные линии и линии с отпайками.	**Все типы линий** (практика США)	**Только линии сверхвысокого напряжения**

Продолжение табл. 5.1

	Передача разрешающего сигнала для ступени с неполным охватом и расширением зоны защиты	Передача разрешающего сигнала для ступени с полным охватом	Блокировка	Деблокировка
Преимущества	Простота. Зона ступени с неполным охватом не зависит от передачи сигнала. Нет необходимости в координации ступеней и выдержек времени защит, расположенных на противоположных концах. (Нет ограничений при совместном использовании устройств различных производителей)	Нет сложностей с излишним охватом зоны защиты благодаря емкостным трансформаторам напряжения или большим переходным сопротивлениям на сильно нагруженных линиях (см.п.п.3.5.1) Может быть использована на очень коротких линиях. Нет проблем, связанных с наличием параллельной линии.	←	←
Недостатки	Проблемы, связанные с зоной действия (охватом) на двухцепных линиях, Т-образных линиях, линиях с трансформаторами. Необходимо учитывать влияние параллельной линии и промежуточную подпитку. Нельзя использовать на линиях с слабым источником питания. Недостаточный охват переходных сопротивлений реле с круговой характеристикой срабатывания	Необходимо согласование ступеней и выдержек времени защит на противоположных концах. Отключение замыкания зависит от канала передачи сигнала (Эта проблема может быть решена с помощью независимой ступени с неполным охватом). Необходимо применение дополнительных мер в случае слабого источника питания (эхо).	← За исключением того, что нет необходимости в принятии дополнительных мер в случае слабого источника питания. Нет возможности контролировать состояние канала.	То же, что и при передаче разрешающего сигнала для ступени с излишним охватом. Однако при возникновении замыканий внутри защищаемой зоны и одновременном повреждении канала передачи отключение гарантировано.

Передача цифровых сигналов

В классическом случае передача сигнала (канал ВЧ связи по ЛЭП, радиоволны, контрольные провода) осуществляется между двумя точками с постоянным временем передачи сигнала. Координация выдержек времени защит и времени передачи сигнала может быть осуществлена с точностью до миллисекунд.

При передаче цифрового сигнала по оптоволоконным кабелям или отдельным микроволновым радио-каналам время передачи сигнала также может быть определено достаточно точно. Однако всё в большей степени начинают использоваться цифровые сети для передачи сигналов, а значит, время передачи сигнала из-за переключений может изменяться.

В этом случае наилучшим образом подходит схема с передачей разрешающего сигнала для ступени с неполным охватом, где не требуется координация выдержек времени защит на разных концах. В наихудшем случае отключение будет происходить с замедлением.

Схемы с блокировкой в этом случае не могут быть использованы.

При использовании защит с сравнением направлений необходимо проводить координацию «эхо» цепей и учитывать кратковременную блокировку.

Во всех случаях каналы для передачи данных должны проходить тщательную проверку на надёжность и безопасность.

5.1.5. Требования к измерительным трансформаторам

Трансформаторы тока и напряжения должны удовлетворять определённым требованиям к точности и поведению в переходном процессе для обеспечения селективности и быстродействия дистанционной защиты.

В частности, искажение формы сигналов из-за насыщения трансформаторов тока и наложения колебаний при разряде в ёмкостных трансформаторах напряжения должно оставаться внутри определённых пределов [5.3].

5.1.5.1. Трансформаторы тока

Трансформаторы тока (ТТ) должны удовлетворять условиям, описанным в STANDARD IEC 60044—1, при трансформации чистого переменного тока без постоянной составляющей [5.4].

По этому стандарту обозначение измерительных ТТ, используемых для подключения цепей защиты, начинается со значения максимальной полной погрешности (5 или 10 %) при протекании предельного тока короткого замыкания, затем следует буква Р (protection), в конце указывается коэффициент предельнй точности (ALF).

Определены 2 класса точности (см. табл. 5.2).

В целом, трансформатор тока для защиты определяется следующими данными.

Номинальный коэффициент трансформации

$K_I = I_{п,\,ном}/I_{в,\,ном}$, например, 600/1 А или 600/5 А.

Номинальная мощность

$P_{ном}(S_{ном})$ — мощность, выдаваемая ТТ тока во вторичную цепь при номинальном токе и номинальной нагрузке, например 30 ВА.

Класс точности

5Р или 10Р.

Коэффициент предельной точности

ALF (например 10 или 20). Если номинальный ток ТТ, без постоянной составляю-

Таблица 5.2

Классы точности трансформаторов тока по IEC 60044—1

Класс точности	Погрешность при номинальном токе $I_{ном}$	Угловая погрешность при номинальном токе $I_{ном}$	Суммарная погрешность при ALF* $I_{ном}$ [1]
5P 10P	±1 % ±5 %	±60 минут —	5 % 10 %

[1] ALF определяет предел точности ТТ — предельную кратность тока, при которой обеспечивается необходимая точность при номинальной нагрузке.

щей, умножить на эту величину, то получим ток, который может быть трансформирован ТТ с определённой точностью при номинальной нагрузке ($\cos\varphi = 1$).

При большем токе произойдёт насыщение ТТ, искажающее форму вторичного тока.

Вторичное внутреннее сопротивление

$R_{вн}$ в Омах.

Пример 5.2:

Измерительный трансформатор тока (для защиты): 400/1 А; 5P10; 30 ВА; $R_{вн}$ = = 6,2 Ом.

Коэффициент ALF используется только в случае подключения номинальной нагрузки. Если нагрузка меньше номинальной, то коэффициент предельной точности увеличивается:

$$ALF' = ALF\frac{P_{вн} + P_{ном}}{P_{вн} + P_{нагр}} = $$

$$= ALF\frac{R_{вн} + R_{ном}}{R_{вн} + R_{нагр}}. \qquad (5.6)$$

где $P_{ном}$ — номинальная нагрузка ТТ,

$P_{вн} = R_{вн} \cdot I^2_{2ном}$ — потери в ТТ,

$P_{нагр} = R_{нагр} \cdot I^2_{2ном}$ — подключенная нагрузка ТТ,

$R_{нагр} = R_К + R_р$ — сопротивление нагрузки,

$R_К$ — сопротивление соединительного кабеля,

$R_р$ — сопротивление реле.

Для дистанционной защиты обычно используются трансформаторы тока класса 5P, имеющие большую точность.

Поведение ТТ в переходном режиме

На рис. 5.4 представлена упрощённая эквивалентная схема замещения ТТ.

Плотность потока ТТ пропорциональна интегралу вторичного напряжения на индуктивном сопротивлении ТТ L_W:

$$B \sim \int u_2(t) \cdot dt = (R_{вн} + R_{нагр}) \int i_2(t) \cdot dt$$

и поэтому пропорциональна площади под графиком тока короткого замыкания. Постоянная составляющая тока КЗ, изменяющаяся в соответствии с постоянной времени контура КЗ (постоянной времени сети Тс), вызывает одностороннее намагничивание ТТ, в результате которого общая кривая изменения B (t) смещается пропорционально постоянной составляющей (рис. 5.5). Для того чтобы учесть это, трансформаторы тока должны иметь значительно большие габариты.

Изменение индукции B определяется следующим выражением [5.9, 5.10]:

$$\frac{B}{B_{m,\,пер}} = 1 + \frac{\omega \cdot T_c \cdot T_{вт}}{T_c - T_{вт}} \times$$

$$\times \left(e^{-\frac{t}{T_c}} - e^{-\frac{t}{T_{вт}}}\right), \qquad (5.7)$$

где $B_{m,пер}$ — апмплитудное значение ин-

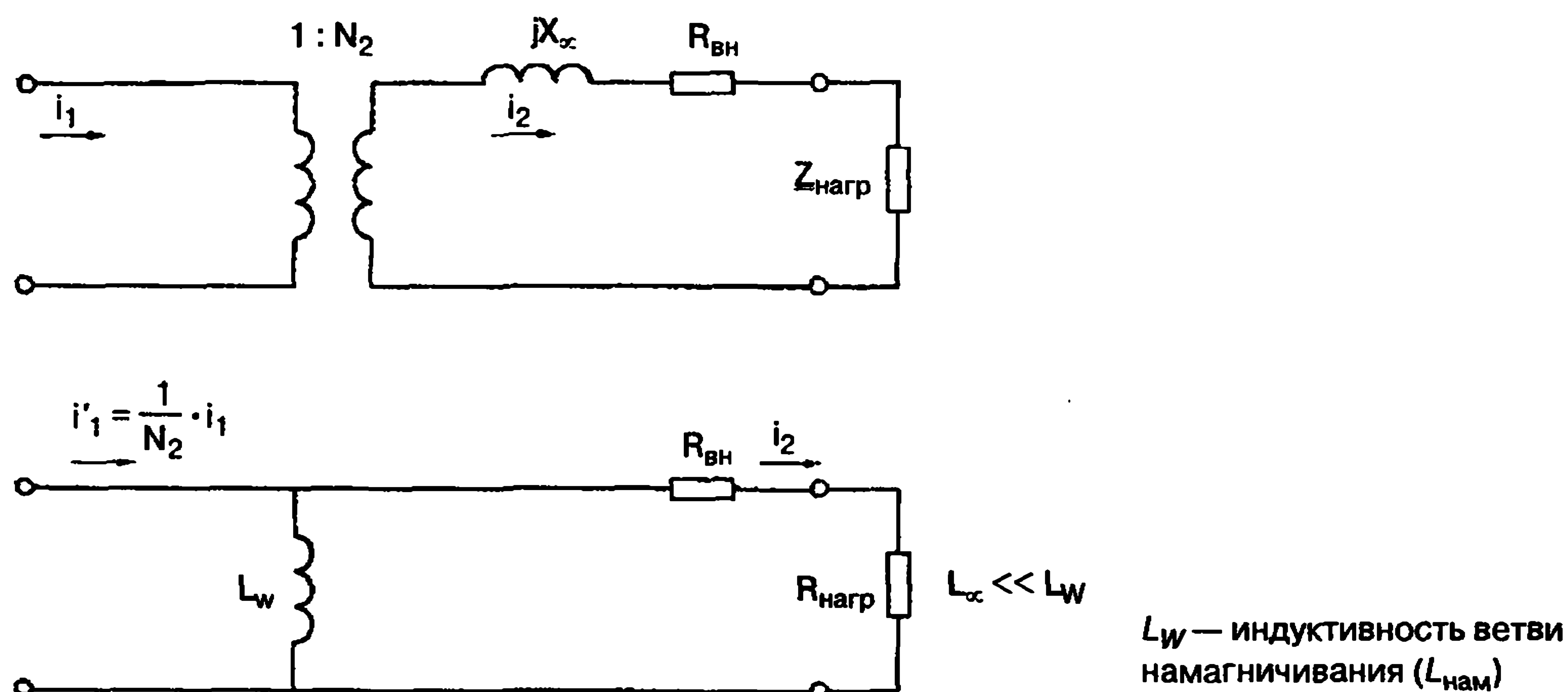


Рис. 5.4. Упрощенная эквивалентная схема замещения ТТ

дукции, обусловленное переменной составляющей тока.

$$\text{При } t_{B\max} = \frac{T_c \cdot T_{\text{вт}}}{T_{\text{вт}} - T_c} \ln \frac{T_{\text{вт}}}{T_c} \tag{5.8}$$

достигается максимальное значение:

$$\frac{B_{\max}}{B_{m,\text{пер}}} = 1 + \omega T_{\text{вт}} \left(\frac{T_c}{T_{\text{вт}}} \right)^{\frac{T_{\text{вт}}}{T_{\text{вт}} - T_c}}, \tag{5.9}$$

где T_C — постоянная времени сети (постоянная времени затухания апериодической составляющей) для рассматриваемого контура короткого замыкания.

$T_{\text{вт}}$ — постоянная времени вторичной цепи трансформатора тока. Она определяется индуктивным сопротивлением ветви намагничивания ТТ $L_W(L_{\text{нам}})$ и суммой активных сопротивлений во вторичной цепи:

$$T_{\text{вт}} = \frac{L_W}{R_{\text{вн}} + R_{\text{нагр}}} = \frac{1}{\omega \cdot \text{tg}\delta}. \tag{5.10}$$

Постоянная времени $T_{\text{вт}}$ снижается с ростом угловой погрешности δ. Это в основном происходит, если в сердечнике ТТ имеются воздушные промежутки.

Для расчёта $T_{\text{вт}}$ на частоте 50 Гц (60Гц) можно использовать следующие выражения:

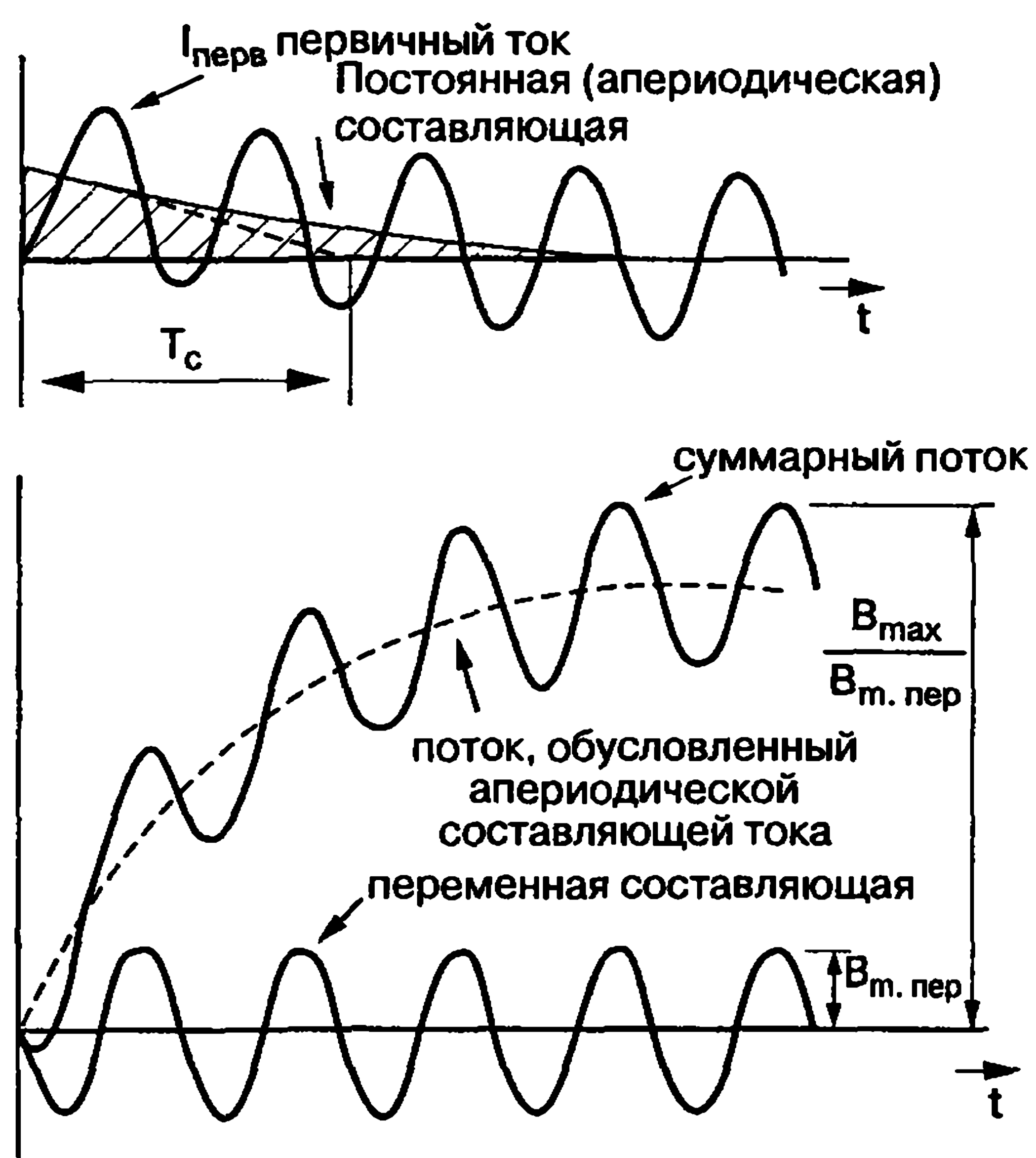


Рис. 5.5. Изменение потока намагничивания (индукции) в случае смещенного однополярного тока КЗ

$$T_{\text{вт}} = \frac{10900}{\delta_{[\min]}} [\text{мс}] \left(T_{\text{вт}} = \frac{9083}{\delta_{[\min]}} [\text{мс}] \right). \tag{5.11}$$

Необходимо заметить, что угловая погрешность, указанная в паспорте, соот-

ветствует номинальной нагрузке ТТ. Если действительная нагрузка меньше номинальной, угловая погрешность уменьшается и постоянная времени ТТ увеличивается. Из выражения (5.7) видно, что при увеличении потока намагничивания необходимо увеличение размеров ТТ для того, чтобы осуществить трансформацию смещённого тока короткого замыкания.

Отношение $\frac{B_{max}}{B_{m,\,пер}}$ соответствует коэффициенту увеличения размеров вследствие переходных процессов K_{TF}, который необходимо учитывать.

Если ТТ должен трансформировать ток без насыщения до момента $t_{вт}$, то в выражении (5.7) $t = t_{вт}$. Если ТТ не должен насыщаться в течение всего аварийного режима, то его размеры должны быть такими, чтобы воспринимать весь поток намагничивания, в соответствии с выражением (5.9).

Размагничивание

Если отключение выключателя происходит в тот момент, когда мгновенное значение тока КЗ равно нулю, то поток при этом максимален. Поэтому после быстрого отключения ТТ может быть всё ещё сильно намагничен из-за наличия постоянной составляющей.

Размагничивание происходит благодаря переходному току размагничивания, протекающему во вторичной цепи ТТ. Но при этом ТТ не размагничивается до нуля, в трансформаторе сохраняется остаточная намагниченность (индукция) $B_{ост}$ (рис. 5.6).

$$B = B_{ост} + (B_{max} - B_{ост})e^{-\frac{t}{T_{вт}}}. \qquad (5.12)$$

Значение $B_{ост}$ достигается приблизительно через время, равное $3T_{вт}$.

Остаточная намагниченность не изменяется в отключённом состоянии. В рабочих условиях она несколько рассеивается, но основная часть остаётся в сердечнике до момента размагничивания [5.7]. Известен только один метод измерения остаточной намагниченности, который подтверждает наличие существенной остаточной намагниченности в ТТ, достигающей по статистике 0—79% [5.8].

Длительно существующая остаточная

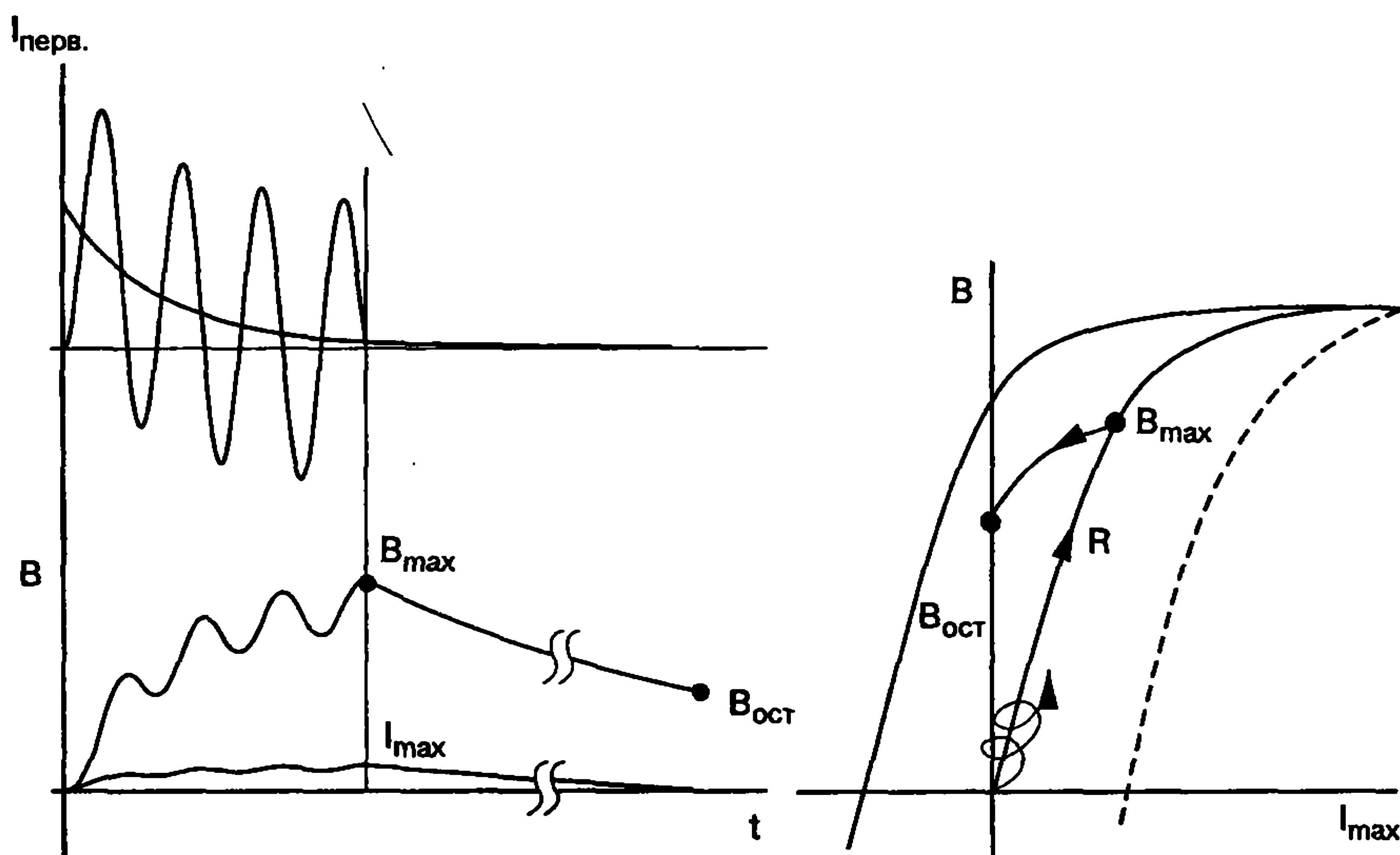


Рис. 5.6. Изменение индукции в процессе намагничивания и размагничивания ТТ

намагниченность крайне редко учитывается при выборе размеров ТТ, поскольку полные токи смещения и большая остаточная намагниченность совпадают очень редко, и проблемы, связанные с этим явлением, практически не возникают.

Учёт же этой длительной остаточной намагниченности приведёт к значительному увеличению размеров ТТ, которые в общем случае не обоснованы.

Практически при выборе размеров ТТ для учета полного смещения тока КЗ вводится некоторый запас, определяемый исходя из статистических данных, т.к. полное смещение тока КЗ наблюдается редко.

В сетях СВН могут использоваться ТТ с воздушными зазорами, которые позволяют значительно уменьшить остаточную намагниченность.

Неуспешное АПВ

Недлительная остаточная намагниченность должна учитываться при АПВ.

В случае неуспешного АПВ намагничивание начинается с определённого значения, равного остаточной намагниченности при включении линии на устойчивое КЗ. В случае наиболее неблагоприятного момента включения намагничивание происходит в том же направлении и добавляется к остаточному намагничиванию.

На рис. 5.7 изображена кривая намагничивания для всего цикла АПВ (В-О-В-О).

При длительной выдержке времени АПВ индукция B после первого замыкания успевает снизиться до значения $B_{ост}$, и поэтому при включении рост снова начнётся с этого значения; если же линия включается на КЗ раньше (ускоренное АПВ), намагниченность может не успеть снизиться до значения $B_{ост}$ и затем будет увеличиваться от некоторого промежуточного значения в соответствии с выражением (5.13).

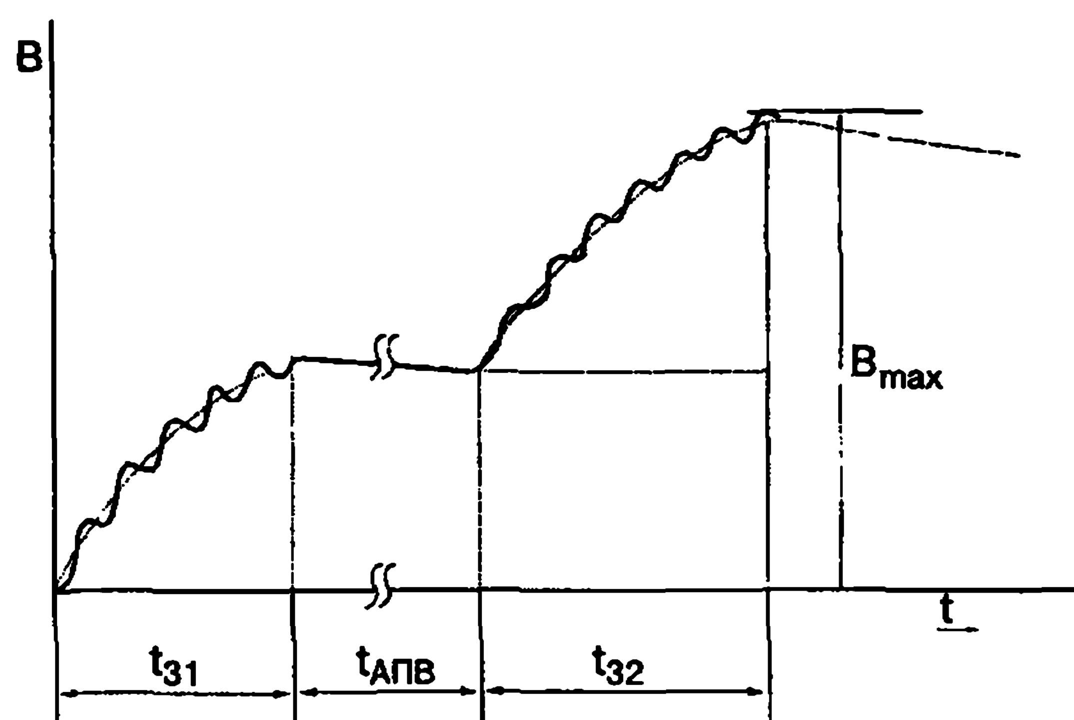


Рис. 5.7. Изменение индукции в ТТ в случае неуспешного АПВ

$t_{з1}$ — время существования первого замыкания

$t_{АПВ}$ — время паузы АПВ

$t_{з2}$ — время существования второго замыкания после АПВ

Для расчёта максимального значения индукции в конце цикла замыкания можно использовать следующее выражение:

$$\frac{B_{max}}{B_{m,\,пер}} = \left[1 + \frac{\omega \cdot T_C \cdot T_{вт}}{T_C - T_{вт}} \times \left(e^{-\frac{t_{з1}}{T_C}} - e^{-\frac{t_{з1}}{T_{вт}}}\right)\right] e^{-\frac{t_{АПВ}+t_{з2}}{T_{вт}}} + \left[1 + \frac{\omega \cdot T_C \cdot T_{вт}}{T_C - T_{вт}}\left(e^{-\frac{t_{з2}}{T_C}} - e^{-\frac{t_{з2}}{T_{вт}}}\right)\right]. \quad (5.13)$$

Классификация ТТ по переходным характеристикам

Требования к переходным характеристикам трансформаторов тока при смещённых токах коротких замыканий (требования к переходным характеристикам) изложены в IEC 60044—6 [5.11].

Этот стандарт определяет 4 класса в зависимости от конструкции сердечника.

Класс TPS

ТТ с замкнутым стальным сердечником и маленьким потоком рассеяния. Транс-

формация определяется характеристикой намагничивания (точка перегиба напряжения, ток намагничивания) и активным сопротивлением вторичной обмотки.

Это устройство соответствует классу X согласно Британскому стандарту 3938 (1973). Используется для дифференциальной защиты.

Класс TPX

TT с замкнутым стальным сердечником без ограничения остаточной намагниченности. Эта конструкция соответствует TT класса P согласно IEC 60044—1. TPX дополнительно определяет переходную характеристику.

Класс TPY

TT с воздушными зазорами, ограничивающими остаточную намагниченность (остаточная намагниченность ⩽ 10 %). В остальном поведение аналогично TPX.

Класс TPZ

TT с линеаризованным сердечником (остаточной намагниченностью можно пренебречь). Указанная точность трансформации соответствует только переменной составляющей. Постоянная составляющая тока короткого замыкания значительно сокращается.

Максимальные значения погрешностей TT различных классов даны в табл. 5.3.

TT с замкнутым стальным сердечником

Эти TT трансформируют постоянную и переменную составляющие с высокой степенью точности в определённом диапазоне. Однако остаточная намагниченность в них очень высока (> 80 %) (рис. 5.8). Поток, появившейся в сердечнике при трансформации тока короткого замыкания с постоянной составляющей, практически не изменяется. Он может снизиться только при протекании тока нагрузки. Однако определенная доля индукции остается и может быть удалена только размагничиванием (при снижении переменного напряжения).

Последствием этого может явиться последующее неуспешное АПВ. В наихудшем случае при замыкании контактов выключателя поток может достигнуть двойного значения (рис. 5.9). Поэтому при

Таблица 5.3

Погрешности TT в соответствии с IEC 60044—6

Класс	Погрешность трансформации при ном. токе (токовая)	Угловая погрешность при ном. токе	MAX ошибка при установленном предельном значении тока КЗ
TPX	±0.5 %	± 30 мин	$\hat{\varepsilon} \leqslant 10\,\%$
TPY	±1.0 %	± 60 мин	$\hat{\varepsilon} \leqslant 10\,\%$
TPZ	±1.0 %	± 180 ± 18 мин	$\hat{\varepsilon} \leqslant 10\,\%$ (только $I\sim$)

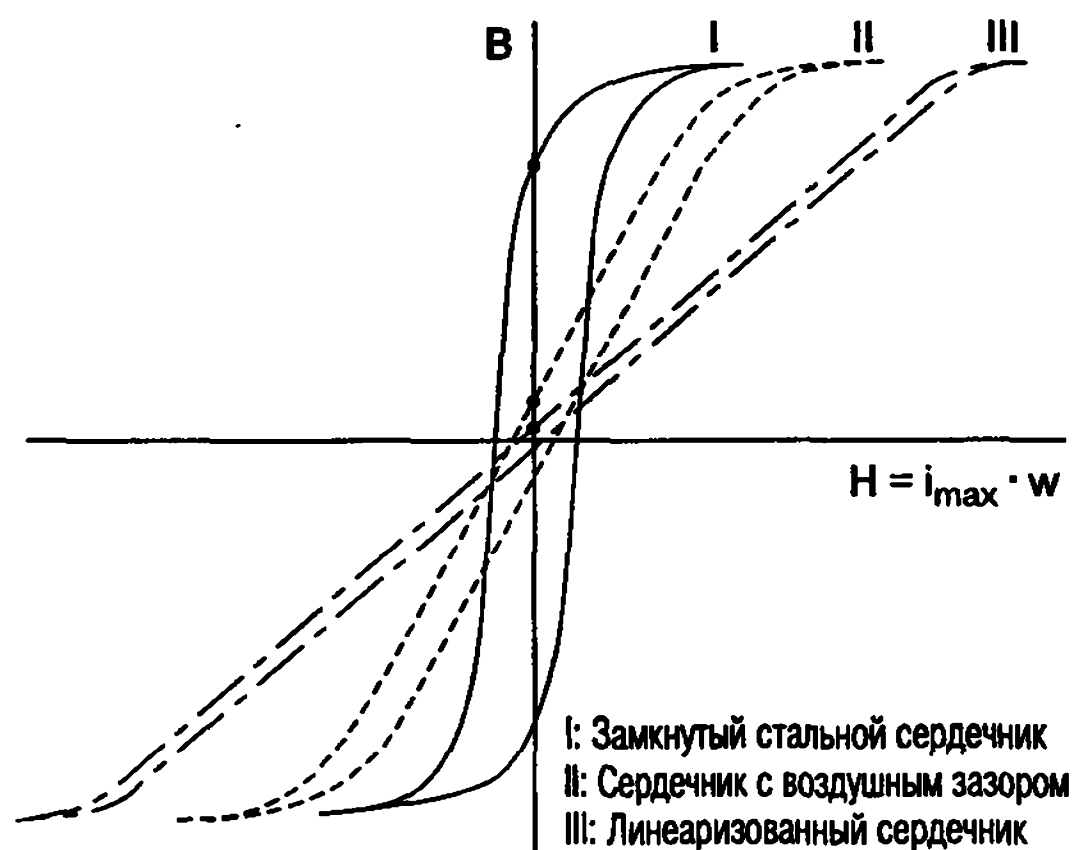


Рис. 5.8. Кривые намагничивания для TT разных классов

наличии АПВ ТТ должен иметь сердечник с удвоенной площадью поперечного сечения[20].

Большинство измерительных ТТ для защиты в системах имеют класс Р (в более старых системах можно найти классы 1 (%) и 3 (%), используемые подобно классам 5P и 10P). Конструкции, позволяющие учитывать постоянную составляющую, стали применяться только в последние 30 лет, т. е. с тех пор, как поведение ТТ в переходном процессе было изучено более подробно [5.5, 5.12, 5.13].

ТТ тока с воздушными зазорами в сердечнике

Воздушный промежуток в сердечнике ТТ значительно сокращает значение остаточной намагниченности. С другой стороны, время, необходимое для размагничивания, сокращается до нескольких секунд и даже ниже.

Однако постоянная времени вторичной цепи трансформаторов тока может быть снижена незначительно, т. к. иначе постоянная составляющая тока не будет трансформироваться правильно (см. выражение 5.28 ниже). Нижним пределом являются значения 200—300 мс. ТТ класса TPY, соответственно, размагничиваются только частично за время срабатывания АПВ (бестоковой паузы) (рис. 5.9).

При больших воздушных промежутках (линеаризованный сердечник) постоянная составляющая значительно сокращается при трансформации, так что лишь небольшое увеличение потока будет в начале. Более того, сердечник полностью размагничивается менее чем за 200 мс, т. к. постоянная времени ТТ равна приблизительно 60 мс.

Это означает, что даже при быстродействующем АПВ к моменту повторного включения поток снижается до нуля (рис. 5.10). Поэтому сечение сердечника может быть значительно меньше. Однако, конструкция трансформатора с разрезным сердечником является более сложной. Соответственно, при использовании необходимо сравнение технико-экономических показателей.

[20] Уменьшение размеров ТТ в связи с допускаемым насыщением ТТ здесь не рассматривается.

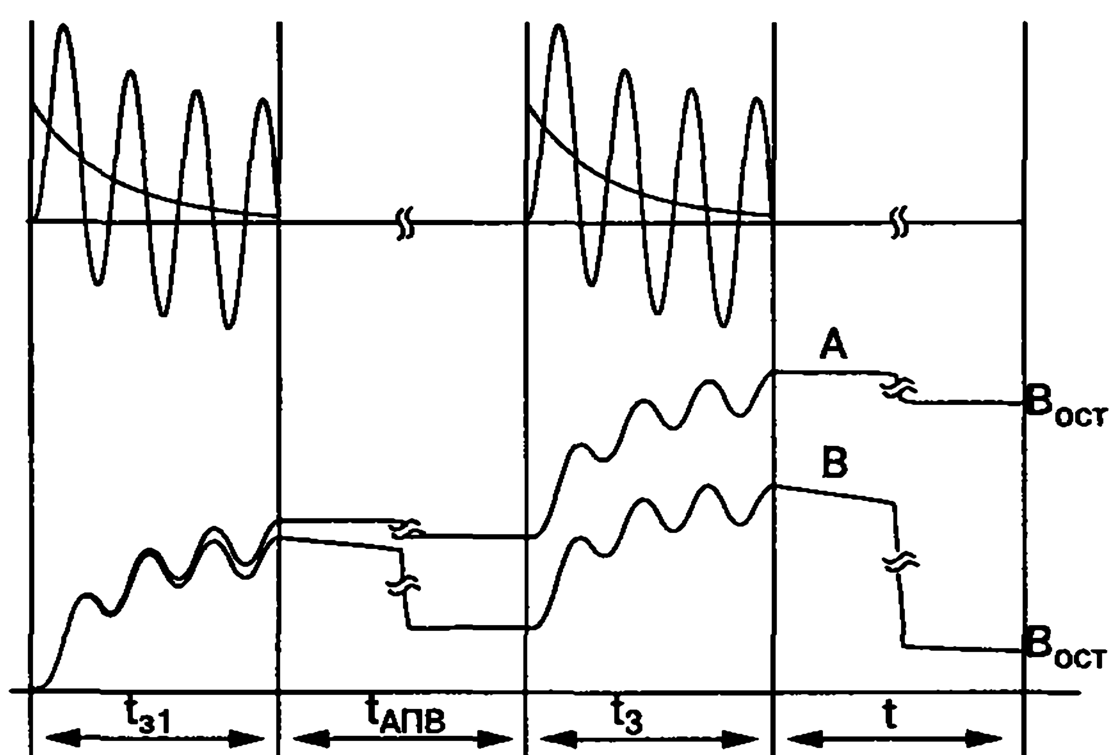


Рис. 5.9. Изменение индукции в ТТ при неуспешном АПВ

A: замкнутый стальной сердечник (TPX)

B: сердечник с воздушными промежутками для снижения остаточной намагниченности (TPY)

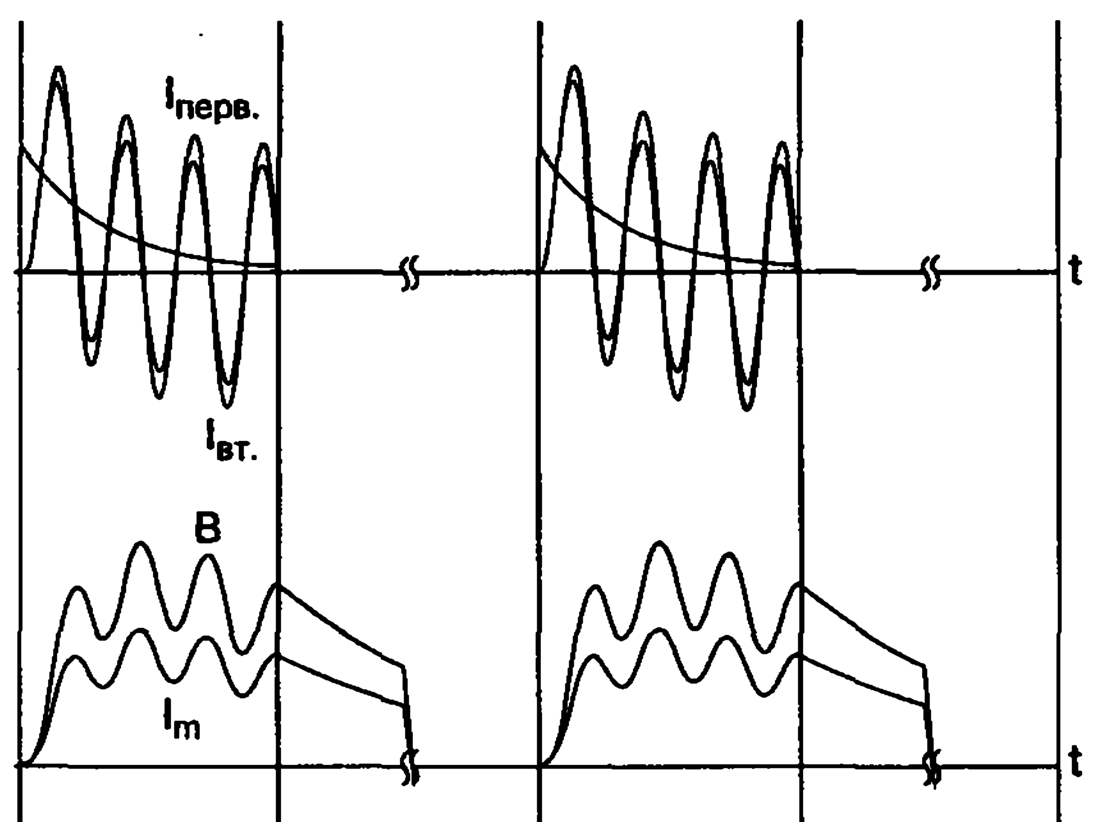


Рис. 5.10. Изменение индукции в линеаризованном сердечнике ТТ (TPZ) в случае неуспешного АПВ

ТТ класса TPZ трансформирует только переменную составляющую с особой точностью. Постоянная составляющая тока трансформируется неправильно из-за сокращённой постоянной времени. Поэтому при протекании переходного процесса в традиционных реле, где используется линейная модель, появляется дополнительная погрешность (рис. 5.11). По этой причине сердечники класса TPZ не используются за пределами Европы. В цифровых реле 7SA5** этой погрешностью можно пренебречь благодаря цифровой фильтрации измеряемых величин.

В Германии ТТ с линеаризованными сердечниками широко распространены, особенно в сетях сверхвысокого напряжения.

Необходимо заметить, что для TPZ сердечников характерны большие токи размагничивания после отключения токов короткого замыкания. В начальный момент времени ток размагничивания равен току намагничивания в момент, когда первичный ток был прерван. При этом постоянная времени спада равна постоянной времени ТТ (рис. 5.10).

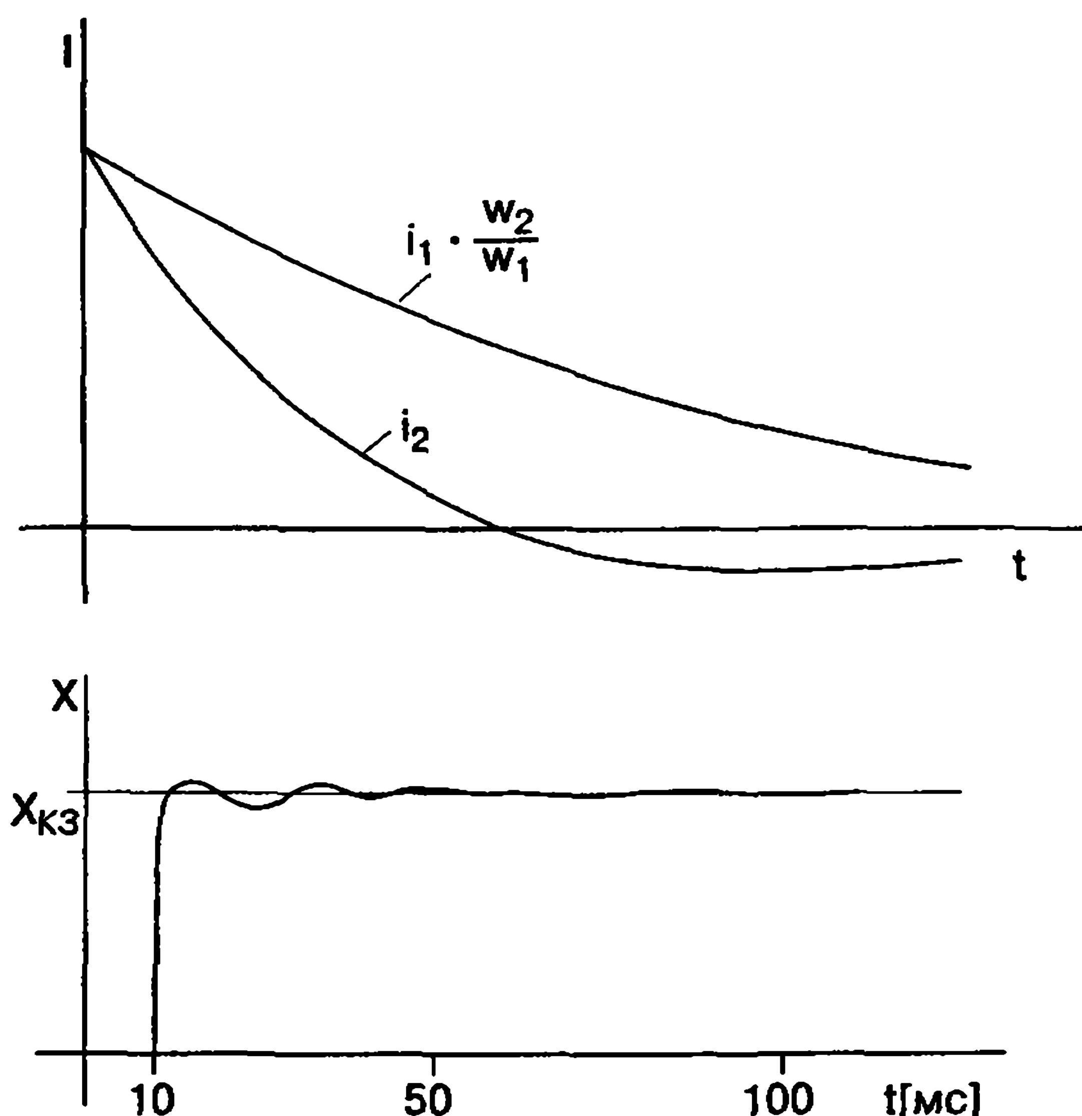


Рис. 5.11. Уменьшение постоянной составляющей во вторичном токе КЗ при использовании ТТ TPZ и влияние на дистанционные измерения

Ток размагничивания вызывает увеличение времени возврата традиционных реле, если токовые пусковые органы обладают соответствующей чувствительностью (например, при комбинированном пуске или при использовании защиты от отказа выключателя). На работу цифровых реле 7SA** это практически не влияет, т. к. постоянная составляющая тока короткого замыкания практически не попадает в реле благодаря цифровой фильтрации.

Требования к конструкции (размерам) трансформаторов тока

При конструировании ТТ следует учитывать переходные характеристики. В этом плане наиболее сильное влияние оказывает постоянная составляющая тока КЗ, учет которой требует существенного увеличения ТТ.

Трансформаторы тока класса ТРХ (ТРХ-СТ)

Сначала рассмотрим обычные ТТ с замкнутым сердечником класса 5Р или 10Р. Для них постоянная времени $T_{вт} = L_W/\Sigma R_2$ всегда больше постоянной времени системы T_c. Обычно $T_{вт}$ имеет порядок нескольких секунд, тогда как максимальное значение T_c около 100 мс.

Если $T_{вт} \gg T_c$, то выражение (5.9) значительно упрощается:

$$\frac{B_{max}}{B_{m,\,пер}} = 1 + \omega T_c. \quad (5.14)$$

Для того чтобы гарантировать отсутствие насыщения в магнитной цепи трансформатора при протекании полностью

смещенных токов короткого замыкания на протяжении всей длительности аварийного режима, размер ТТ должен быть увеличен. Это увеличение определяется коэффициентом K_{TF}. [5.9—5.13].

$$K_{TF} = \frac{B_{max}}{B_{m,\,пер}} = 1 + \omega T_c =$$

$$= 1 + \frac{X_c}{R_c} = 1 + \frac{X_S + X_L}{R_S + R_L}. \qquad (5.15)$$

T_c — постоянная времени затухания постоянной (апериодической) составляющей тока КЗ для соответствующего контура короткого замыкания, рассчитанная с учетом из значений полного сопротивления источника (X_S, R_S) и линии (X_L, R_L).

Из выражений (5.6) и (5.15) можно рассчитать коэффициент предельной точности для трансформатора

$$ALF = \frac{I_к}{I_{ном}} \cdot \frac{R_{вн} + R_{нагр}}{R_{вн} + R_{ном}} K_{TF}. \qquad (5.16)$$

Вблизи генераторов и трансформаторов, а также в сетях сверхвысокого напряжения отношение X/R обычно большое. Соответственно, коэффициент K_{TF} может достичь значений $K_{TF} = 30$ (при $T_c = 100$ мс) и даже больше.

Использование таких больших ТТ практически невозможно из-за их высокой стоимости, особенно если ТТ встраивается в корпус выключателя.

Следовательно, при проектировании релейной защиты необходимо учитывать возможность высокой степени насыщения ТТ.

Поведение дистанционной защиты при насыщении ТТ

При насыщении ТТ часть тока «теряется» (поглощается), и, следовательно, измеряемое сопротивление увеличивается ($Z = U/I$). Это значит, что зона охвата сокращается. Это допустимо при близких замыканиях, т. к. расстояние до границы зоны защиты значительно.

При замыканиях вблизи конца зоны защиты уменьшение зоны охвата недопустимо, т. к. в этом случае повреждение будет отключаться только второй ступенью с соответствующей выдержкой времени.

Это означает, что размер ТТ должен быть таким, чтобы при замыканиях, близких к концу линии, не происходило насыщения магнитной цепи ТТ в течение всего времени, когда производятся измерения $T_{изм}$.

$$K'_{TF} = 1 + \frac{\omega \cdot T_c \cdot T_{вт}}{T_c - T_{вт}} \left(e^{-\frac{T_{изм}}{T_c}} - e^{-\frac{T_{изм}}{T_{вт}}} \right) \qquad (5.17)$$

Для ТТ с замкнутым стальным сердечником ($T_{вт} \gg T_c$) получаем следующее выражение:

$$K'_{TF} = 1 + \omega T_c \left(1 - e^{-\frac{T_{изм}}{T_c}}\right). \qquad (5.18)$$

Практические требования к размерам ТРХ-СТ

Для того, чтобы уменьшить размер ТТ, применяемых для защиты, при близких КЗ допускается некоторое насыщение.

При этом ТТ должен трансформировать достаточный ток для того, чтобы обеспечить отключение без дополнительной выдержки времени. Необходимые минимальные значения коэффициента увеличения размеров ТТ K_{TF} определяются с помощью стандартных измерений.

Ниже рассмотрены основные условия, влияющие на выбор ТТ.

1) Условие для близких замыканий без АПВ

$$ALF'_1 \geqslant a \frac{I_{КЗmax\,(близкое\ замыкание)}}{I_{ном}}. \qquad (5.19)$$

Коэффициент «*a*» принимает указанные в табл. 5.4 значения.

Таблица 5.4

Требования к ТТ, работающим с цифровыми реле (Siemens)

Тип реле	Постоянная времени системы		
	T_C < < 30 мс	T_C < < 50 мс	T_C < < 100 мс
7SA511	*a* = 2	*a* = 2	*a* = 3
7SA513	*a* = 2	*a* = 2	*a* = 2
7SA522 и 7SA6xx	*a* = 1	*a* = 2	*a* = 2

2) Условие для замыканий в конце линии без АПВ

$$ALF_2' \geq K_{TF}' \frac{I_{\text{КЗ в конце линии}}}{I_{\text{ном}}}. \qquad (5.20)$$

При замыканиях в конце защищаемой зоны ступени с неполным охватом ТТ должен нормально работать, по крайней мере, до завершения измерений. Коэффициент K_{TF} рассчитывается по выражениям (5.17) или (5.18), исходя из известных данных системы.

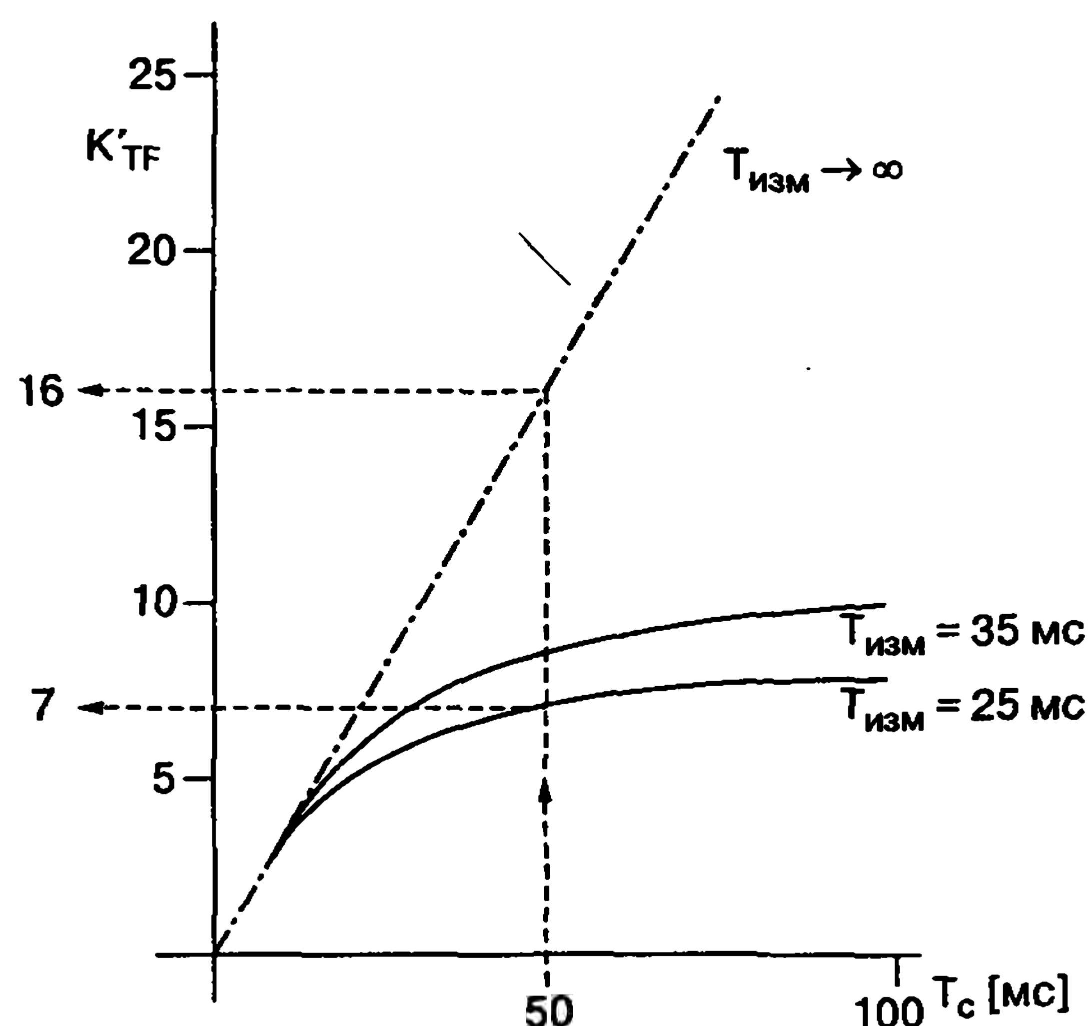


Рис. 5.12. Зависимость коэффициента K_{TF}' ТТ с замкнутым стальным сердечником от постоянной времени сети и времени измерений

Минимальное необходимое время измерений, включая время запаса принимается равным:

для 7SA511: $T_{\text{изм}}$ = 35 мс;

для 7SA513/7SA22, 7SA6: $T_{\text{изм}}$ = 25 мс.

На рис. 5.12 представлены графики изменения K_{TF}', рассчитанные по выражению (5.17).

Очевидно, что при ограничении времени, в течение которого должно отсутствовать насыщение, размеры применяемых ТТ можно значительно уменьшить, особенно если постоянная времени системы имеет достаточно большое значение.

При простой аппроксимации без учёта точных значений параметров системы можно принимать K_{TF}' = 10.

Типовые тесты на новейших версиях цифровых защит показали, что благодаря меньшему времени измерения и меньшей зависимости их от насыщения, возможно использование меньших значений K_{TF}. Для терминалов 7SA522 и 7SA63 может быть принято значение $K_{TF} \geq 5$.

В любом случае, в руководствах по эксплуатации, либо в технических данных, предоставляемых фирмой—производителем терминала, должны быть указаны действительные значения коэффициентов для определения размера трансформатора.

Размеры ТТ в случаях, когда АПВ не используется, должны удовлетворять условиям 1) и 2).

Учёт остаточной намагниченности

Для учёта остаточной намагниченности следует использовать уточненное значение коэффициента K_{TF}:

$$K_{\text{уточн}} = K_{TF} \cdot K_{\text{ост}}, \qquad (5.21)$$

где $K_{ост} = \dfrac{1}{1 - \dfrac{B_{ост}\%}{100}}$.

Если предположить остаточную намагниченность ТТ равной 60—80% и учесть полное смещение тока КЗ, то размеры ТТ значительно возрастут. В таком случае обычно используют сердечники TPY и TPZ. Это те случаи, возникающие в европейских странах, когда ТТ в сетях СВН проектируются с расчётом на неуспешный цикл АПВ В-О-В-О, т.е. 2 последовательных замыкания. [5.14] Подробно процедура проектирования приведена в IEC60044-6. [5.11]

Требование к размерам ТРХ-СТ при использовании АПВ

Поскольку ТРХ-СТ не успевает размагнититься за время срабатывания АПВ, то появляются следующие условия:

3) Близкие замыкания при использовании АПВ

ТТ должен трансформировать весь ток первичного замыкания до отключения. Для вторичного тока КЗ, появляющегося при повторном включении на КЗ, дополнительно учитывается условие 1)

$$K'_{TF3} = 1 + \frac{\omega \cdot T_C \cdot T_{вт}}{T_C - T_{вт}} \times \left(e^{-\frac{T_{з1}}{T_C}} - e^{-\frac{T_{з1}}{T_{вт}}}\right) + a \qquad (5.22)$$

При $T_{вт} \gg T_C$

$$K'_{TF3} = 1 + \omega T_C\left(1 - e^{-\frac{T_{з1}}{T_C}}\right) + a, \qquad (5.23)$$

где значение T_C равно постоянной времени при близком замыкании.

Коэффициент предельной точности:

$$ALF'_1 \geq K'_{TF3} \frac{I_{КЗmax\ в\ конце\ линии}}{I_{ном}}. \qquad (5.24)$$

4) Замыкание в конце линии при использовании АПВ

В этом случае ТТ должен трансформировать ток первичного короткого замыкания (при КЗ в конце зоны защиты) полностью, а также ток, возникающий при повторном включении на КЗ, в течение всего времени проведения измерений.

Получаем следующее соотношение для K'_{TF}:

$$K'_{TF4} = \left[1 + \frac{\omega \cdot T_C \cdot T_{вт}}{T_C - T_{вт}}\left(e^{-\frac{T_{з1}}{T_C}} - e^{-\frac{T_{з1}}{T_{вт}}}\right)\right] + \left[1 + \frac{\omega \cdot T_C \cdot T_{вт}}{T_C - T_{вт}}\left(e^{-\frac{T_{изм}}{T_C}} - e^{-\frac{T_{изм}}{T_{вт}}}\right)\right]. \qquad (5.25)$$

При $T_{вт} \gg T_C$ это выражение значительно упрощается:

$$K'_{TF4} = \left[1 + \omega T_C\left(1 - e^{-\frac{T_{з1}}{T_C}}\right)\right] + \left[1 + \omega T_C\left(1 - e^{-\frac{T_{изм}}{T_C}}\right)\right]. \qquad (5.26)$$

Коэффициент предельной точности:

$$ALF'_4 \geq K'_{TF4} \frac{I_{КЗmax\ в\ конце\ линии}}{I_{ном}}. \qquad (5.27)$$

Размеры ТТ при использовании АПВ должны удовлетворять условиям 3) и 4).

Пример 5.3

Дано: Схема сети представлена на рис. 5.13.

Номинальное напряжение системы и воздушной линии — 110 кВ.

Реле связано с ТТ медным кабелем длиной 80 м, сечением 2,5 мм^2.

Коэффициент трансформации ТТ должен составлять — 600/1 А.

Рекомендуемый тип ТТ — А 5Р, 30 ВА (20 % — внутренняя нагрузка).

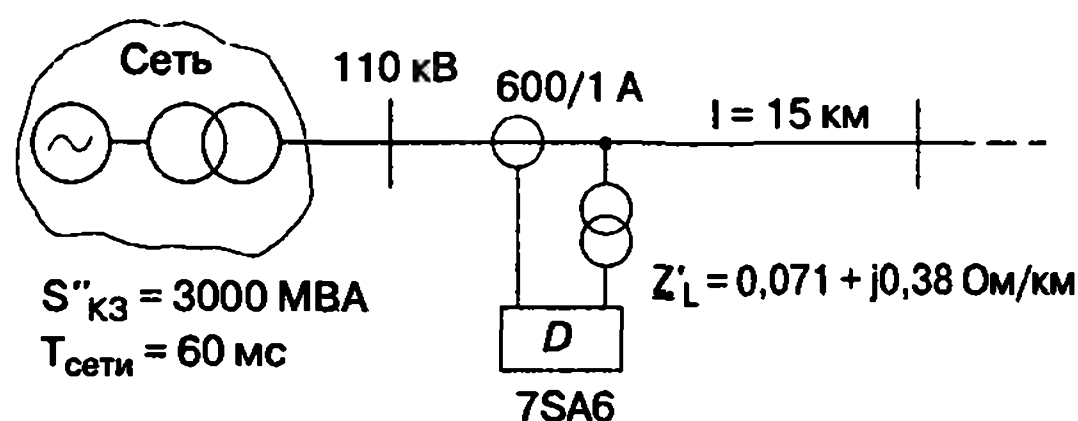


Рис. 5.13. Конфигурация системы для примера расчета

Вопрос 1

Каким должен быть коэффициент предельной точности, если используется дистанционное реле 7SA6?

Вопрос 2

Каким должен быть коэффициент предельной точности, если предполагается работа ТТ в цикле АПВ? (время действия выключателя 60 мс)

Решение

Условие 1): близкое замыкание без АПВ.

Максимальный ток короткого замыкания при близком КЗ

$$I_{\text{КЗmax}} = \frac{S''_{\text{КЗ}}}{1{,}1 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{3000 MBA}{1{,}1 \cdot \sqrt{3} \cdot 110} =$$

= 14,4 кА.

При T_c = 60 мс для реле 7SA6: а = 2.

Тогда по (5.19):

$$ALF_1' = 2\frac{14400}{600} = 48.$$

Условие 2): замыкание у границы зоны без АПВ

Полное сопротивление источника

$$X_S \approx Z_S = \frac{1{,}1 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{КЗ}}} = \frac{1{,}1 \cdot 100\text{кВ}}{\sqrt{3} \cdot 14{,}4\text{кА}} =$$

= 4,85 Ом;

$$T_c = \frac{L_S}{R_S} = \frac{X_S/\omega}{R_S}$$

и

$$R_S = \frac{X_S}{T_c \cdot \omega} = \frac{4{,}85}{314 \cdot 0{,}06} = 0{,}26\ \text{Ом}.$$

При замыкании на границе зоны (85 % от длины линии) получаем следующие значения:

$X_L = 0{,}85 \cdot 15 \cdot 0{,}38 = 4{,}8$ Ом,

$R_L = 0{,}85 \cdot 15 \cdot 0{,}071 = 0{,}91$ Ом.

Соответствующий ток короткого замыкания:

$$I_{\text{КЗ гр.зоны}} = \frac{1{,}1 \cdot U_{\text{ном}}/\sqrt{3}}{Z_S + Z_L} = \frac{1{,}1 \cdot U_{\text{ном}}/\sqrt{3}}{4{,}85 + 4{,}8} =$$

= 7,24 кА.

Постоянная времени:

$$T_c = \frac{(X_S + X_L)/\omega}{R_S + R_L} = \frac{(4{,}85 + 4{,}8)/\omega}{0{,}26 + 0{,}91} = 26\ \text{мс}.$$

Из выражения (5.18) при $T_{\text{изм}}$ = 25 мс получаем следующее:

$K'_{TF2} = 6{,}0$

и $ALF_2' = 6{,}0 \cdot \frac{7240}{600} = 73.$

Следовательно, размеры ТТ должны быть выбраны, исходя из условия 2.

Активное сопротивление кабеля

$$R_K = 2\frac{\rho \cdot l}{Q} = \frac{0{,}0179 \cdot 80}{2{,}5} = 1{,}15\ \text{Ом}.$$

Нагрузка реле 7SA6

$R_p \leqslant 0{,}1$ Ом.

Суммарная нагрузка

$R_{\text{нагр}} = 1{,}25$ Ом.

Тогда номинальный коэффициент предельной точности

$$ALF \geqslant \frac{6 + 1{,}25}{6 + 30} \cdot 73 = 17{,}7.$$

Если АПВ не используется, то можно принять $ALF = 20$.

Условие 3): близкое замыкание с АПВ

Для первичного замыкания время срабатывания защиты (время измерений) и время действия выключателя должны суммироваться:

$T_{31} = 35 + 60 = 95$ мс.

Подставляя это значение и $T_c = 60$ мс в выражение (5.23), получаем: $K'_{TF3} = 15 + 2 = 17$ и

$$ALF'_3 = 17 \cdot \frac{14400}{600} = 408.$$

Условие 4): замыкание у границы зоны с АПВ

При $T_{31} = 85$ мс, $T_c = 26$ мс и $T_{изм} = 25$ мс по выражению (5.26) получаем следующее:

$$K'_{TF4} = 9 + 6 = 15,$$

$$ALF'_3 = 15 \cdot \frac{7240}{600} = 181.$$

Конструкция ТТ при использовании АПВ в этом случае должна быть определена в соответствии с условием близкого замыкания, т. е условием 3):

$$\text{ALF} \geqslant \frac{6 + 1{,}25}{6 + 30} \cdot 408 = 82.$$

В этом случае необходимо использование ТТ большей мощности, например 60ВА (15 ВА — внутренняя нагрузка) с удвоенным коэффициентом трансформации, например 1200/1 А.

Рабочий коэффициент предельной точности в этом случае равен:

$$ALF'_3 = 17 \cdot \frac{14400}{1200} = 204.$$

Тогда номинальный коэффициент предельной точности:

$$\text{ALF} \geqslant \frac{15 + 1{,}25}{15 + 60} \cdot 204 = 44.$$

На практике: $ALF = 50$.

Выбранный в итоге ТТ (60ВА; 1200/1; ALF > 50) очень большой. В этом случае рекомендуется использовать линеаризованный сердечник.

Трансформаторы тока класса TPY (TPY-CT)

Размеры ТТ TPY таковы, что он может нормально работать в течение всего цикла АПВ (С-0-С-0).

Благодаря меньшей остаточной намагниченности и меньшей постоянной времени ТТ, сердечник частично размагничивается за время бестоковой паузы. Поэтому коэффициент увеличения размера меньше по сравнению с ТТ с замкнутым сердечником.

Чем меньше постоянная времени вторичной цепи $T_{вт}$ по сравнению с временем бестоковой паузы ($T_{АПВ}$), тем сильнее уменьшается поток за время паузы. Для того, чтобы ошибка оставалась в пределах 10 %, коэффициент увеличения размеров не должен превышать значения

$$K'_{TF} \leqslant 0{,}1\omega T_{вт}. \qquad (5.28)$$

Если в течение всего цикла короткого замыкания ТТ не должен насыщаться, то для определения размеров необходимо использовать выражение (5.13). Этого достаточно, если ток вторичного замыкания трансформируется до момента завершения измерений.

В этом случае $T_{32} = T_{изм}$ и

$$K'_{TF} = \left[1 + \frac{\omega \cdot T_c \cdot T_{вт}}{T_c - T_{вт}}\left(e^{-\frac{T_{31}}{T_c}} - e^{-\frac{T_{31}}{T_{вт}}}\right)\right] \times$$

$$\times e^{-\frac{t_{АПВ} + t_{изм}}{T_{вт}}} + \left[1 + \frac{\omega \cdot T_c \cdot T_{вт}}{T_c - T_{вт}}\left(e^{-\frac{t_{изм}}{T_c}} - \right.\right.$$

$$\left.\left.- e^{-\frac{t_{изм}}{T_{вт}}}\right)\right]. \qquad (5.29)$$

Пример 5.4

Дано: см. предыдущий пример: (рис. 5.13).

TPY-TT, $T_{BT} = 0{,}5$ с.

Время паузы: $T_{АПВ} = 0{,}4$ с

Решение

Условие 1): близкое замыкание с АПВ

Из выражения (5.29) при $T_C = 60$ мс, $T_{31} = 95$ мс, $T_{изм} = 35$ мс

$$K'_{TF1} = [13{,}9]\cdot 0{,}43 + [7{,}3] = 13{,}3;$$

$$ALF'_1 = 13{,}3\cdot\frac{14400}{600} = 319.$$

Условие 2): замыкание, близкое к границе зоны

Из выражения (5.29) при $T_C = 26$ мс, $T_{31} = 95$ мс, $T_{изм} = 35$ мс

$$K'_{TF2} = [7{,}9]\cdot 0{,}43 + [5{,}9] = 9{,}3$$

$$ALF'_2 = 9{,}3\frac{7240}{600} = 112.$$

В этом случае, как и ожидалось, близкое замыкание вызывает более суровые требования к размерам ТТ.

Соответствующий номинальный коэффициент точности:

$$ALF \geqslant \frac{6+1{,}25}{6+30}319 = 64,$$

т. е. можно использовать $ALF = 80$.

Проведём для сравнения аналогичный расчёт для ТТ с замкнутым сердечником, т. е. при $T_{вт} = 5$ с вместо 0,5с:

$$K'_{TF1} = [15]\cdot 1 + [7{,}4] = 22{,}4.$$

При использовании TPY-TT получаем уменьшение поперечного сечения сердечника ТТ на (1—13,3/22,4) 100% — 40 %.

Трансформаторы тока класса TPZ (TPZ-CT)

Линеаризованный сердечник ТТ позволяет трансформировать ток короткого замыкания без насыщения в наиболее тяжелых условиях. Это означает, что размер ТТ определяется выражением (5.7):

$$K^{**}_{TF} = 1 + \omega T_{вт}\left(\frac{T_C}{T_{вт}}\right)^{\frac{T_{вт}}{T_{вт}-T_C}}. \qquad (5.30)$$

Пример 5.5

Дано: см. предыдущий пример (рис. 5.13).

Определить коэффициент увеличения размера при использовании сердечника TPZ.

ТТ должен удовлетворять требованиям IEC 60044—6 и иметь угловую погрешность $\delta = 3^\circ$.

Решение

Подставим $\delta = 3^\circ$ в выражение (5.11) и получим

$T_{вт} = 61$ мс.

Постоянная времени системы при близком замыкании $T_C = 60$ мс.

Из выражения (5.30):

$$K'_{TF1} = 8.$$

Так как ТТ полностью размагничивается за время паузы, коэффициент увеличения размера очень мал; этот коэффициент относится также и к случаю неуспешного АПВ.

Определим уменьшение поперечного сечения сердечника:

— на (1—8/22,4) 100% — 64 %, по сравнению с ТТ TPX

— на (1—8/13,3) 100% — 40 %, по сравнению с ТТ TPY

В случае больших токов коротких замыканий с большими постоянными времени, особенно при использовании АПВ, ТТ TPZ позволяют значительно уменьшить занимаемое пространство.

Это является большим преимуществом при использовании встроенных ТТ.

При этом необходимо учесть увеличение стоимости из-за более сложной конструкции трансформатора.

Таблица 5.5

Спецификация ТТ TPZ (Германия)

Уровень напряжения	$I''_{КЗ}$	T_c	Коэффициент трансформации K_I	Амплитудная погрешность при $I_{ном}$	Угловая погрешность	Номинальная нагрузка
110 кВ	24 кА	25 мс	1200/1	±1 %	180 мин	20 Вт
380 кВ	80 кА	75 мс	2400/1 1200/1	±1 %	180 мин	20 Вт 5 Вт

В таблице 5.5 указаны технические данные типичных ТТ с линеаризованным сердечником, используемых в Германии в сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

5.1.5.2. Трансформаторы напряжения

Трансформаторы напряжения приводят первичное напряжения системы к вторичному номинальному напряжению 100 или 110 В.

На практике применяются ёмкостные и индуктивные трансформаторы напряжения.

Индуктивные ТН работают как обычные трансформаторы. Они обеспечивают получение для дистанционной защиты практически идеальных сигналов с необходимой точностью и поведением в переходном процессе. Изменение первичного напряжения отслеживается очень точно, даже если напряжение снижается с $U_{ном}$ до 0,01 $U_{ном}$. Поэтому использование индуктивных трансформаторов является предпочтительным, особенно в сетях среднего и высокого напряжения. В Германии эти трансформаторы также преобладают в сетях сверхвысокого напряжения.

Емкостные ТН состоят из ёмкостных делителей напряжения с высокого до среднего уровня и выходного трансформатора, который производит дальнейшее преобразование до более низкого уровня.

Эти ТН более рентабельны в сетях сверхвысокого напряжения и дополнительно позволяют подключать ВЧ-каналы к линии через ёмкостные делители. Отдельное высокочастотное соединение, как в случае индуктивного ТН, не требуется. С другой стороны, разряд отключенной линии при использовании ёмкостных трансформаторов напряжения несколько осложняется, т. к. существует риск появления феррорезонанса.

Емкостные ТН содержат большое число элементов, которые накапливают энергию (конденсаторы, катушки индуктивности), и, соответственно, должны заряжаться-разряжаться при изменении напряжения.

При скачкообразном изменении первичного напряжения возникает переходный процесс, который накладывается на вторичное напряжение [5.5].

При близких замыканиях, когда напряжение падает до нескольких процентов от номинального, напряжение помехи может быть соизмеримо с напряжением короткого замыкания основной частоты.

Это влияние особенно значительно, если линия короткая и напряжение, соответствующее границе зоны, мало.

На более длинных линиях использование ёмкостных ТН в случае замыканий, близких к границе зоны, не так опасно, поскольку напряжение снижается не так сильно.

В любом случае решающим является

отношение сопротивления источника к сопротивлению линии, т. к. оно определяет напряжение в месте расположения реле при КЗ, близких к концу линии.

Обычно частота сигналов помехи ниже 25 Гц или выше 250 Гц. Поэтому, цифровые реле обеспечивают хорошее подавление этих составляющих.

С учётом этого влиянием ёмкостных трансформаторов напряжения можно пренебречь при падении напряжения до 4 % от номинального. Это соответствует максимальному отношению $Z_S/Z_L = 25$.

В любом случае поведение ёмкостного ТН в переходном процессе должно контролироваться. Производители предоставляют отчёты о проведённых опытах, которые демонстрируют поведение ТН в переходных режимах, когда напряжение снижается до нуля, при различных углах возникновения замыканий (напряжение минимально и максимально) и различной вторичной нагрузке.

В прошлом в особенно важных случаях проверку ёмкостных ТН необходимо было производить в высоковольтных лабораториях с подключённой защитой [5.16].

В настоящее время поведение ёмкостных трансформаторов напряжения может быть смоделировано с помощью программного обеспечения EMTP или NETOMAC. Таким образом можно производить проверку работы трансформатора вместе с алгоритмом работы дистанционной защиты на компьютере [5.17]. Параметры линейной модели ТН могут быть предоставлены производителем.

Индуктивные трансформаторы напряжения

Особая классификация индуктивных трансформаторов напряжения представлена в IEC 60044—2.

Как правило, используются однофазные изолированные ТН. Вторая фаза (фаза В) заземлена. Коэффициент трансформации при этом, например:

$$K_U = \frac{110000В}{\sqrt{3}} / \frac{100В}{\sqrt{3}} / \frac{100В}{3}.$$

Вторая вторичная обмотка с коэффициентом трансформации 100/3 В используется, если напряжение смещения (нулевой последовательности) должно измеряться с помощью обмоток, соединённых по схеме разомкнутого треугольника. Его максимальное значение составляет 100 В в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящую катушку нейтралью.

Цифровые реле способны рассчитывать напряжение смещения с помощью программного обеспечения: $\underline{U}_E = \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C$. Это означает, что обмотки, соединенные в схему разомкнутого треугольника, могут не использоваться для дистанционной защиты и направленной защиты от замыканий на землю на линии. Их применение может быть ограничено контролем измерительных цепей напряжения.

При соединении обмоток двух трансформаторов напряжения по схеме открытого треугольника номинальный коэффициент трансформации относится к линейным напряжениям, например 20 000/100 В. Определение напряжения смещения (напряжения нулевой последовательности) в этом случае невозможно.

Номинальная мощность трансформаторов напряжения изменяется от 10 до 300 ВА.

Большая номинальная мощность необходима для электромеханических дистанционных защит (до 120 ВА на *уставке короткой зоны*).

В случае статических или цифровых дистанционных защит нагрузка ТН менее

1 ВА. Соответственно, мощность ТН зависит от других подключённых потребителей.

Определённые в IEC 60044—5 для целей релейной защиты ТН классов 3Р и 6Р имеют относительно большие погрешности (табл. 5.6).

Для дистанционной защиты, особенно при измерении малых напряжений, лучше подходит класс, определённый в Германском стандарте VDE 0414, часть 3, как класс для измерения напряжений и для целей релейной защиты (см. табл. 5.7).

При применении в сетях высокого и сверхвысокого напряжения обычно выделяется особая вторичная обмотка для защиты. В этом случае для дистанционной защиты достаточно класса 3Р. Если для измерений и защиты используется одна и та же обмотка, то необходимо рассмотреть применение ТН более высокого класса точности.

Емкостные трансформаторы напряжения

Емкостные ТН подобно индуктивным можно классифицировать по коэффициенту трансформации и классу точности (табл. 5.8).

К емкостным ТН должны быть предъявлены дополнительные требования, обусловленные особенностями переходных процессов в них при глубокой посадке напряжения при КЗ.

На рис. 5.14 представлена основная схема емкостного ТН. Феррорезонансный фильтр с гасящим резистором R_F обеспе-

Таблица 5.6

Классы ТН для защиты согласно IEC 60044—2

Класс ТН	Допустимая ошибка при напряжении 0,05 $U_{ном}$ и 1 $U_{ном}$	
	Погрешность определения напряжения ε_U	Угловая погрешность φ_u
3P	±3.0 %	120 мин
6P	±6.0 %	240 мин

Таблица 5.7

ТН для измерений и защиты согласно VDE 0414, часть 3

Класс	Допустимая погрешность определения напряжения ε_U, %		Допустимая угловая погрешность φ_u, мин	
	при $1 \cdot U_{ном}$	при $0,05 \times U_{ном}$	при $1 \cdot U_{ном}$	при $0,05 \times U_{ном}$
0,1	0,1	1,0	5	40
0,2	0,2	1,0	10	40
0,5	0,5	1,0	20	40
1	1	2,0	40	80
3	3	6,0	120	240

Таблица 5.8

Предельные погрешности емкостных ТН для защиты в соответствии с IEC 60044-5 (2004)

Класс	Относительная погрешность, % $U_{ном}$			Угловая погрешность, ± мин		
	при 2 % $U_{ном}$	при 5 % $U_{ном}$	при 100 % $U_{ном}$	при 2 % $U_{ном}$	при 5 % $U_{ном}$	при 100 % $U_{ном}$
3P	6,0	3,0	3,0	240	120	120
6P	12,0	6,0	6,0	480	240	240

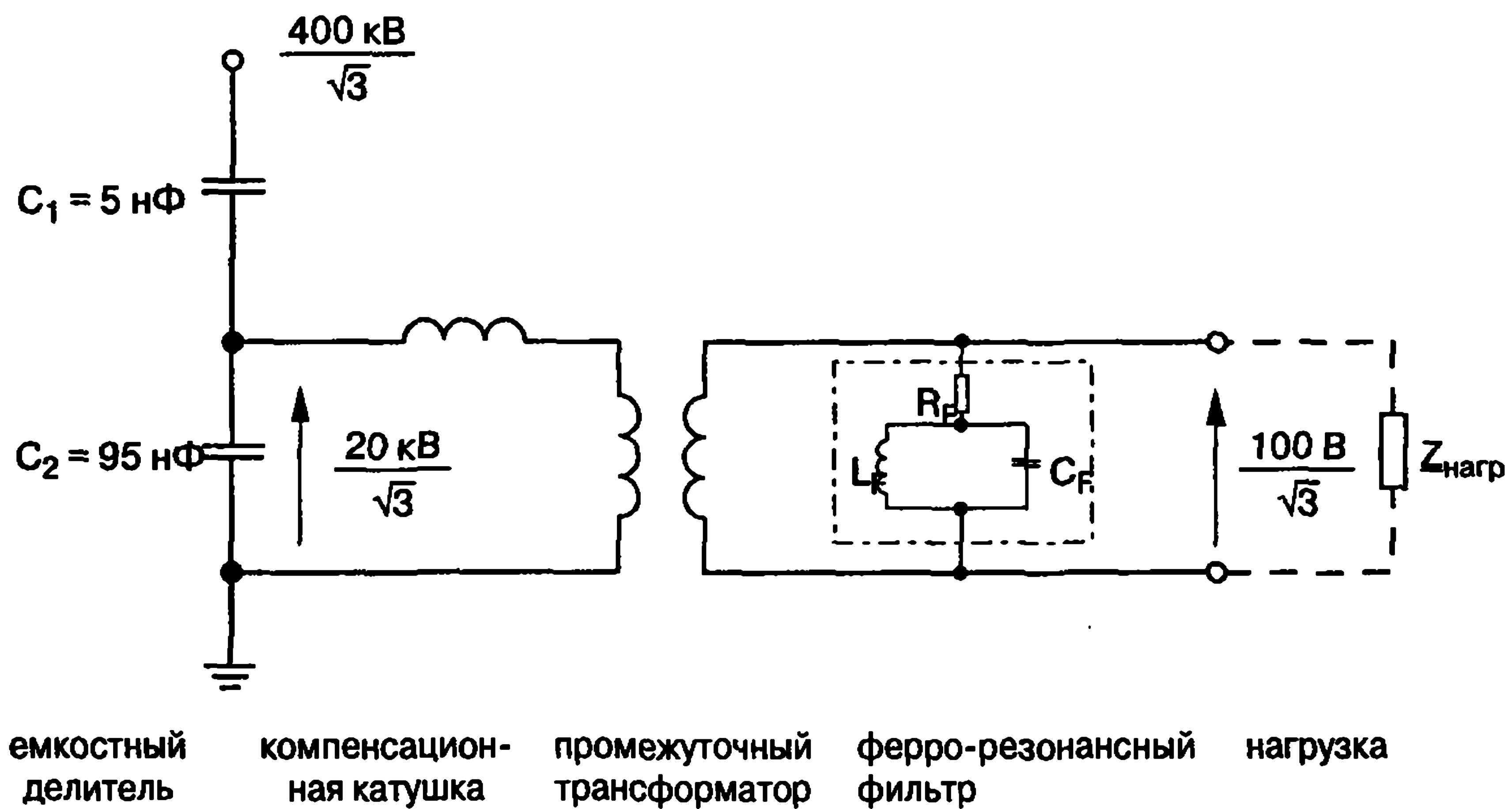


Рис. 5.14. Емкостный трансформатор напряжения, основная схема

чивает подавление субгармонических колебаний, возникающих из-за насыщения сердечника промежуточного трансформатора в условиях перенапряжений.

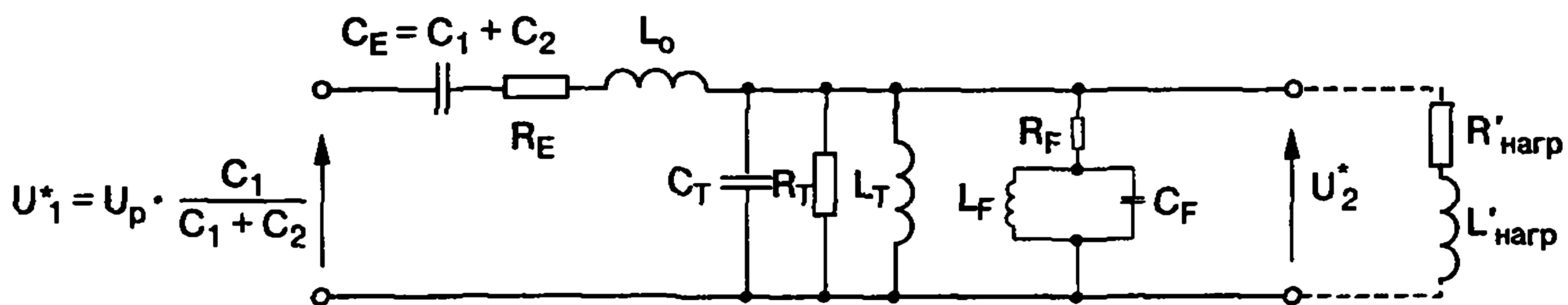
На рис. 5.15 приведена эквивалентная схема замещения емкостного ТН. Для лучшего понимания там же представлены типичные технические данные. Они относятся к ТН, используемым в сетях сверхвысокого напряжения, со средним напряжением $20/\sqrt{3}$ кВ.

В зависимости от угла возникновения замыкания возможно несколько вариантов развития событий после резкого снижения первичного напряжения.

1) Замыкание в момент прохождения напряжением своего максимума

Такие повреждения преобладают в кабельных сетях. Они обусловлены пробоем изоляции.

В этом случае ёмкость первичной обмотки промежуточного трансформатора



типичные значения для $\frac{20}{\sqrt{3}}$ кВ

$C_E = 100$ нФ $R_F = 135$ кОм $U_1^* = \frac{20}{\sqrt{3}}$ кВ

$R_E = 2$ кОм $C_F = 33{,}7$ нФ

$L_O = 105$ Гн $L_F = 300$ Гн

$L_T = 4000$ Гн

$C_T = 600$ пФ $Z'_{нагр} = \left(\frac{U_2^*}{U_2}\right)^2 \cdot Z_{нагр} = \left(\frac{20/\sqrt{3}}{0{,}1/\sqrt{3}}\right)^2 \cdot Z_{нагр} = 40{,}0 \cdot Z_{нагр}$

Рис. 5.15. Эквивалентная схема замещения емкостного ТН

относительно земли C_T разряжается через компенсационную катушку индуктивности в цепь короткого замыкания.

Возникают затухающие колебания с частотой приблизительно 500—2000 Гц (рис. 5.16). Аналогичные, но менее интенсивные колебания возникают также в случае индуктивного ТН.

С увеличением активной нагрузки колебания быстро затухают. Благодаря относительно высокой частоте эти колебания можно легко отфильтровать. Поэтому они не влияют на работу цифровых дистанционных защит.

2) Возникновение замыкания в момент перехода напряжения через ноль

Такие повреждения, как показывает практика, возникают редко, в основном, при включении на КЗ. Для защиты это тяжелый режим. Основными влияющими факторами здесь являются параметры нагрузки и феррорезонансных цепей.

Работа без нагрузки

Сначала рассмотрим случай, когда нагрузка трансформатора очень мала, т. е. практически отсутствует. Этот случай является типичным для статических или цифровых защит, когда дополнительная нагрузка отсутствует.

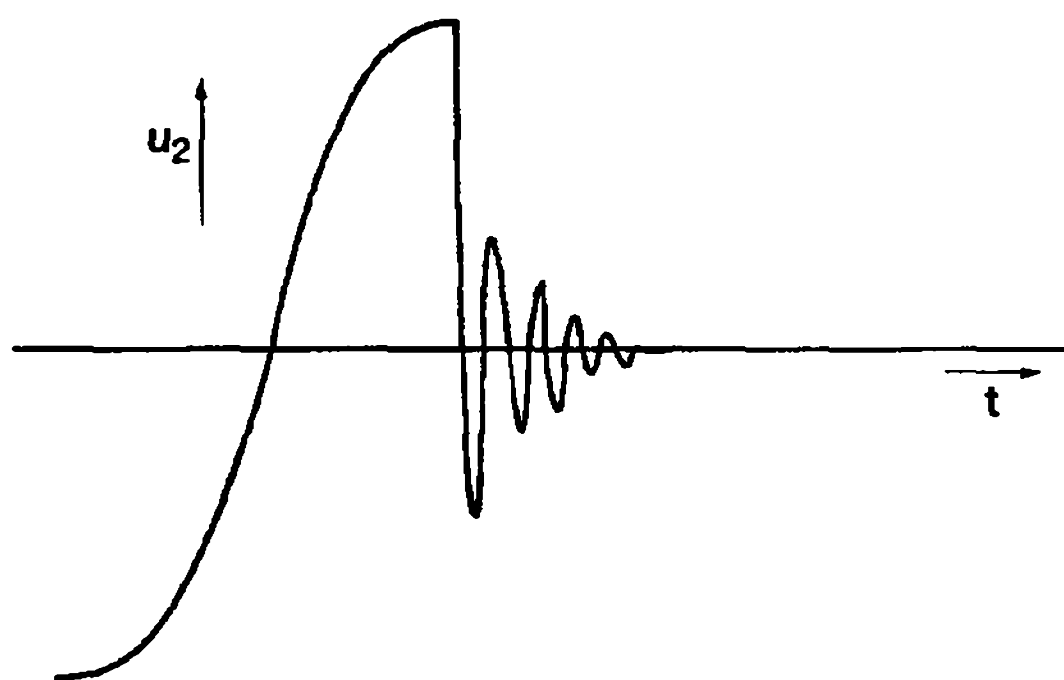


Рис. 5.16. Емкостный ТН, осциллограмма разряда в случае возникновения замыкания при U_{max}

В этом случае энергия, запасённая в сердечнике промежуточного трансформатора, рассеивается через ёмкости ёмкостного делителя напряжений C_E с частотой колебаний порядка 5—10 Гц. Колебания достигают своего максимального значения, равного 10—20 % от амплитудного значения напряжения, присутствовавшего до возникновения замыкания, через 25—50 мс.

Для расчетов переходного процесса можно пользоваться следующими формулами:

$$\frac{U_L}{U_{L0}} = \frac{\omega}{\omega_{ном}} e^{-t/\tau} \cdot \sin\omega t, \qquad (5.31)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{1}{L_T \cdot C_E}}$ и $\tau = \frac{2 \cdot L_T}{R_E}$.

Пример 5.6

Исходные данные указаны на рис. 5.15:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}} = 50\frac{1}{c}, \text{ т. е. } f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{50}{2\pi} = 8 \text{ Гц};$$

$$\tau = \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} = 4 \text{ с}.$$

Значение напряжения в начальный момент:

$$\left(\frac{U_L}{U_{L0}}\right)_{t=0} = \frac{\omega}{\omega_{ном}} = \frac{50}{314} \sim$$

$$\sim 16\,\% \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}. \qquad (5.32)$$

Эти низкочастотные колебания могут быть исключены цифровыми фильтрами основной частоты. Поэтому они не оказывают практически никого влияния даже при очень низком напряжении короткого замыкания.

Работа с активной нагрузкой

Если нагрузка ТН активная, то ток в ёмкостном делителе увеличивается. Если замыкание происходит в момент перехода напряжения через ноль, результирующий скачок напряжения на конденсаторе C_E максимален. Это означает, что накопленная энергия также максимальна. После возникновения короткого замыкания (оно соответствует короткому замыканию на входе эквивалентной схемы замещения) C_E разряжается через активную нагрузку с апериодическим затуханием постоянной составляющей.

Для расчета можно использовать следующее соотношение:

$$\frac{U}{U_{L0}} \approx \frac{1}{\omega \cdot C_E \cdot R_{нагр}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right), \quad (5.33)$$

где $\tau_1 \approx R_{нагр} C_E$ и $\tau_2 \approx \dfrac{L_0}{R_{нагр}}$.

Пример 5.7

Мощность активной нагрузки каждой фазы $P_{нагр}$ = 100 Вт, тогда сопротивление нагрузки

$$R_{нагр} = (U_ф^2 / P_{нагр}) = (100/\sqrt{3})^2/100 = $$
$$= 33 \text{ Ом}.$$

Приводим к среднему напряжению:

$$R_{нагр} = \left(\frac{20000/\sqrt{3}В}{100/\sqrt{3}В}\right) \cdot 33 = 1320 \text{ кОм}.$$

Постоянные времени переходного колебательного процесса:

$$\tau_1 = 1320 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 132 \text{ мс};$$

$$\tau_2 = \frac{105}{1320 \cdot 10^3} = 0{,}08 \text{ мс}.$$

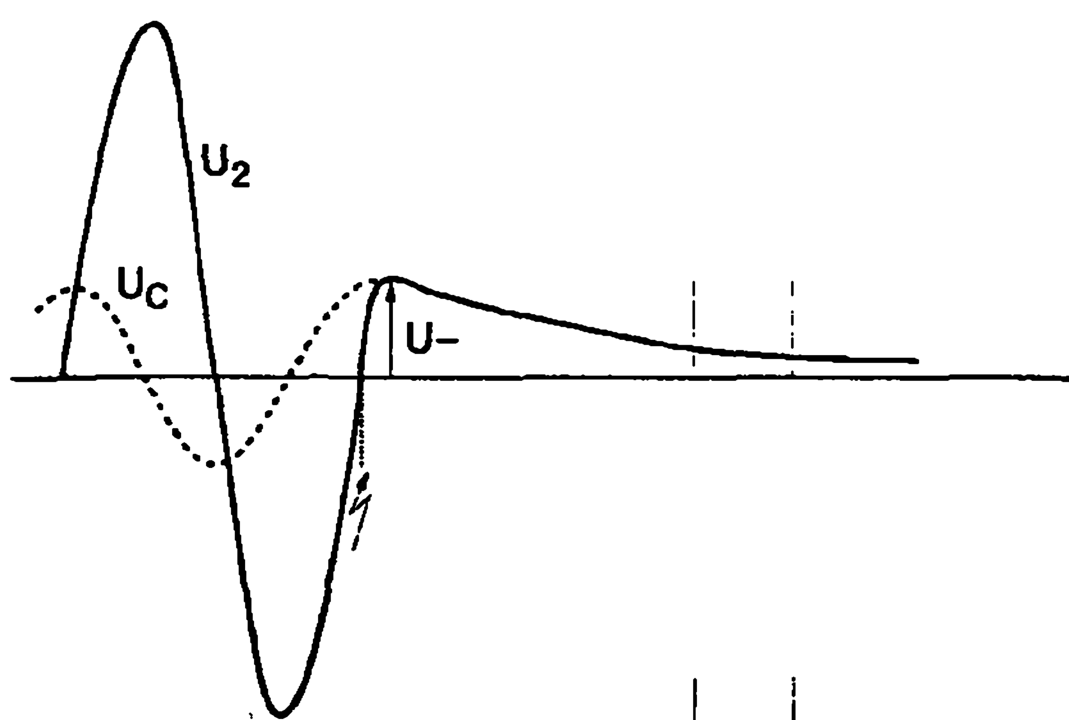


Рис. 5.17. Емкостный ТН, осциллограммы разряда в случае возникновения замыкания при $U = 0$ и большой активной нагрузке

Через время τ_2 амплитуда колебаний составляет

$$A = \frac{1}{\omega \cdot C_E \cdot R_{нагр}} =$$

$$= \frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 1320 \cdot 10^3} =$$

$$= 0{,}024 \equiv 2{,}4\,\% \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}.$$

Спад определяется постоянной времени τ_1 (рис. 5.17).

Амплитуда апериодического затухающего переходного процесса будет значительно выше при меньшей ёмкости конденсаторов и большем значении нагрузки, например, при C1 + C2 = 50 нФ и $S_{нагр}$ = = 200 ВА, ее значение достигает 9,6%. Однако, и значение τ_1 уменьшится до τ_1= = 33 мс.

Эта апериодическая составляющая также отфильтровывается цифровой дистанционной защитой и не вызывает значительной погрешности.

Активно-индуктивная нагрузка

В этом случае могут возникнуть низкочастотные затухающие колебания, т. к.

индуктивная нагрузка $L_{нагр}$ и индуктивность компенсационной катушки вместе с ёмкостью C_E составляют резонансный контур (рис. 5.14).

Частота и амплитуда сильно зависят от нагрузки.

Большое сопротивление нагрузки с маленьким cosφ вызывает появление колебаний с большой амплитудой и слабым затуханием.

Феррорезонансный фильтр

Резонансный фильтр (L_F, R_F) с небольшим сопротивлением (R_F) вызывает интенсивные переходные колебания, аналогичные тем, которые возникают при активно-индуктивной нагрузке [5.18]. Их амплитуда может достигать 15—20 % напряжения предшествующего режима, но в течение примерно 20 мс после возникновения КЗ резко снижается.

Однако, необходимо находить компромисс между феррорезонансным затуханием при включении и отключении линии и снижением колебаний, возникающих при КЗ.

На рис. 5.18 изображён график затухающего переходного процесса в емкостном ТН, полученный при возникновении КЗ

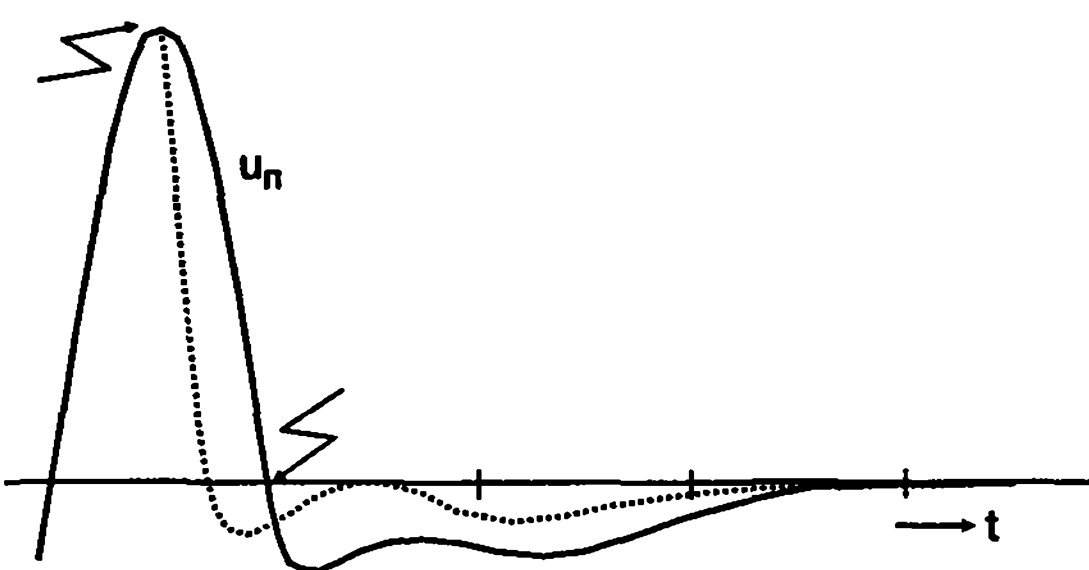


Рис. 5.18. Осциллограмма переходного процесса в емкостном ТН при возникновении повреждения в момент, когда $U_п = U_{max}$ (пунктирная кривая) и когда $U_п = 0$

в момент, когда $U_п$ = max и $U_п$ = 0. Технические данные ТН приведены на рис. 5.15. При $S_{нагр}$ = 65ВА и cosφ = 0,8 приведённые к стороне вторичного напряжения $100/\sqrt{3}$ сопротивления: $R_{нагр}$ = 1660 кОм и $L_{нагр}$ = = 3950 Гн.

Такой вид кривой характерен для сетей СВН с относительно высокой ёмкостью делителя напряжения. В переходном процессе присутствуют апериодическая и быстрозатухающая, благодаря ферро-резонансному фильтру и реактивной составляющей нагрузки, колебательная составляющие,

Емкостные ТН, используемые в сетях более низкого напряжения могут иметь ёмкостные делители с меньшими значениями ёмкостей, поэтому переходный процесс в таких трансформаторах получается более медленным с большим значением начальных амплитуд.

В общем случае большая активная нагрузка вызывает быстрые переходные процессы с большой амплитудой колебаний, тогда как небольшая активная нагрузка вызывает длительный переходный процесс с малой амплитудой колебаний.

Первый вариант может быть использован для медленных электромеханических дистанционных реле.

В некоторых случаях максимальная нагрузка ТН является не лучшим вариантом для быстродействующих электростатических и цифровых реле. Среднее значение активной нагрузки может гарантировать наилучшее протекание переходного процесса. В любом случае необходима консультация с производителем емкостных ТН.

Рекомендации при использовании ёмкостных ТН вместе с цифровой защитой

Цифровая защита представляет собой маленькую нагрузку. Если дополнитель-

ной нагрузки нет, то ТН практически ненагружен.

Для достижения быстрого затухания переходного процесса необходима дополнительная активная нагрузка (по крайней мере, равная половине номинальной).

При выборе схемы ТН необходимо учитывать, что колебания с частотой в диапазоне от 25 до 250 Гц не могут быть отфильтрованы в достаточной степени и поэтому могут вызвать появление погрешностей при проведении измерений.

Крайне важно избегать больших индуктивных нагрузок.

IEC рекомендует использование таких схем, в которых амплитуда переходных колебаний через определенное время T_S после возникновения замыкания не превысит определенного значения — в % от амплитуды напряжения, существовавшего до возникновения КЗ (рис. 5.19).

В табл. 5.9 приведены классы переходных характеристик.

В случае быстродействующих дистанционных реле со временем измерения менее 1 периода этого требования не достаточно [5.19]. Следует предусматривать дополнительные меры для снижения влияния составляющих с указанными выше частотами.

В любом случае необходим компромисс между быстродействием и областью срабатывания для ступеней с неполным охватом защищаемой зоны. Быстродействие (менее одного периода) потребует значительно сократить область срабатывания для того, чтобы снизить влияние переходных процессов в ТН при отношениях Z_S/Z_L более 25. Современные цифровые защиты используют адаптивные алгоритмы, которые либо автоматически сокращают область срабатывания, либо увеличивают время срабатывания в случае возникновения повреждений с крайне большим изменением напряжения [5.20, 5.21, 5.22].

Определение направления в цифровых защитах не зависит от переходного процесса в емкостном ТН, т.к. для определения направления КЗ используется напряжение неповреждённых фаз. Поэтому схемы сравнения направлений могут быть

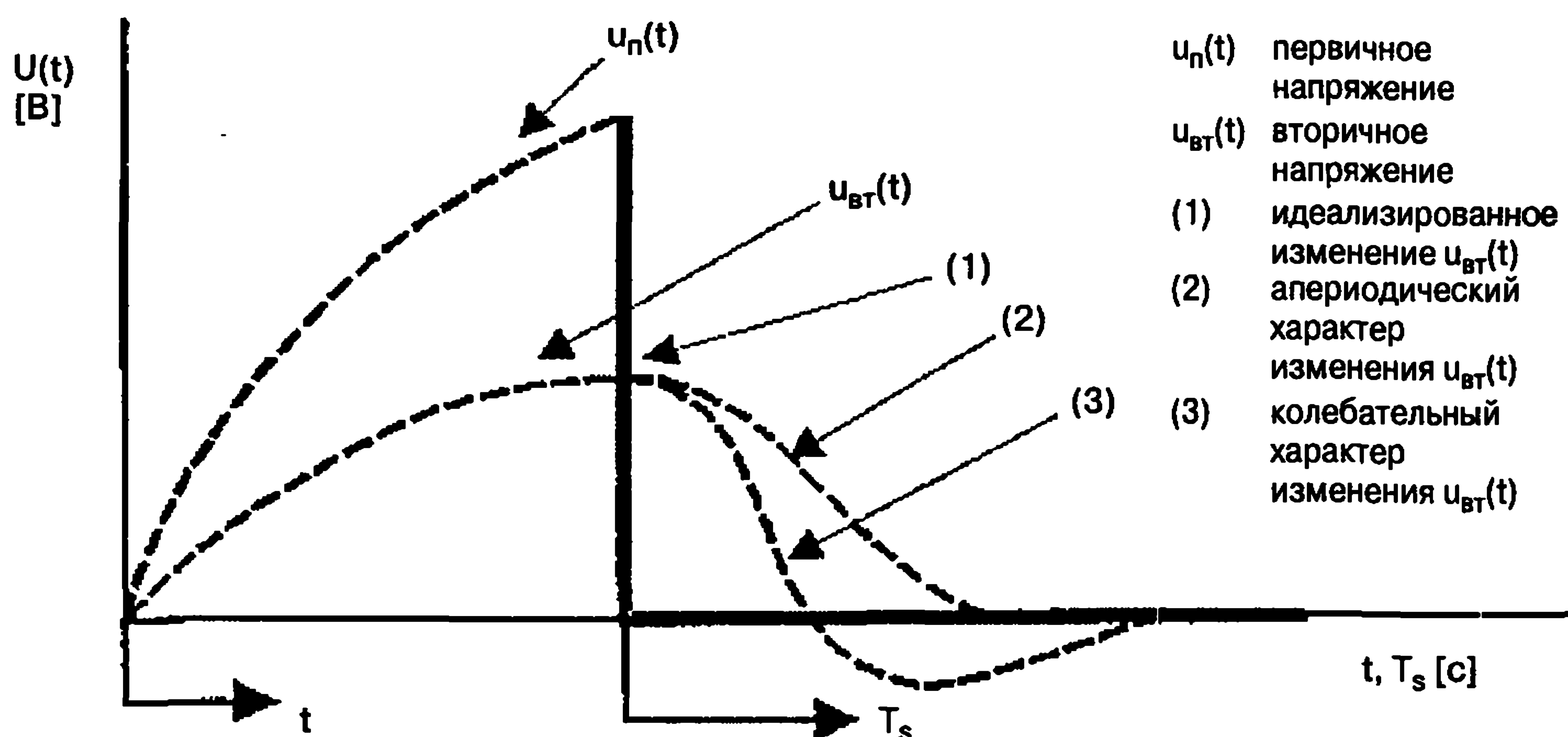


Рис. 5.19. Переходный процесс в цепях емкостного ТН в соответствии с рекомендациями IEC 60044—5

Таблица 5.9

Стандартные классы переходных характеристик в соответствии с IEC 60044-5

Время T_S, мс	Отношение $\frac{U_{ВТ}(t)}{\sqrt{2}U_{ВТ}} \cdot 100\%$		
	Классы		
	3PT1 и 6PT1	3PT2 и 6PT2	3PT3 и 6PT3
10	—	⩽ 25	⩽ 4
20	⩽10	⩽ 10	⩽ 2
40	⩽ 10	⩽ 2	⩽ 2
60	⩽ 10	⩽ 0,6	⩽ 2
90	⩽ 10	⩽ 0,2	⩽ 2

Замечание 1: Для указанных классов переходных характеристик напряжения на вторичной обмотке $U_{ВТ}(t)$ могут содержать апериодические либо колебательные затухающие составляющие и для надежного их подавления должен использоваться фильтр.

Замечание 2: ТН с классами переходных характеристик 3PT3 и 6PT3 должны быть использованы с фильтрами.

Замечание 3: Другие значения отношений и времени Ts должны быть согласованы между производителями и пользователями.

использованы совместно с емкостными ТН и в случае коротких линий.

При указанных выше условиях, цифровые дистанционные защиты 7SA можно использовать вместе с ёмкостными ТН при соотношении $\frac{Z_S}{Z_L} \leqslant 25$ без возникновения каких-либо проблем [5.20]. В более тяжёлых условиях необходимо изучить влияние на точность измерений и время отключения с помощью проверок методом моделирования.

5.2. Дистанционная защита в распределительных сетях

5.2.1. Общие положения

Наиболее распространённой защитой в распределительных сетях является токовая ступенчатая защита IDMTL (с зависимой характеристикой выдержек времени). Тем не менее, дистанционная защита используется в разветвлённых распределительных сетях, так как позволяет обеспечить достаточную селективность и быстродействие [5.24].

На воздушных линиях дистанционная защита обычно используется в сочетании с АПВ, контролирующим зону расширения. АПВ может иметь дополнительное время замедления, DAR (задержанное АПВ) в добавление к обычно используемому времени паузы в трёх фазах, RAR (ускоренное АПВ). Иногда (на коротких линиях или Т-образных линиях) используется защита с каналом для передачи телесигнала.

В кабельных сетях дистанционная защита используется как самостоятельная основная защита, либо как резервная для дифференциальных защит. Если дистанционная защита используется как основная, то часто применяется схема с передачей разрешающего сигнала по контрольным проводам или оптоволоконным каналам.

Поэтому большинство коротких замы-

каний в распределительных сетях отключается без выдержки времени. Только при удалённых замыканиях, близких к противоположному концу, и неуспешном АПВ отключение может быть произведено второй ступенью (300—400 мс). Отключение с большей выдержкой времени может произойти только в случае отказа срабатывания выключателя или защиты. Поэтому при использовании дистанционной защиты в распределительных сетях повышается качество передачи электроэнергии.

Конструкция устройства

Дистанционные защиты с переключением входных величин обычно используются там, где это экономически выгодно, и там, где их можно встроить непосредственно в привод выключателя ячейки РУНН. Соответствующие цифровые односистемные защиты фидеров 7SA510/11 имеют все необходимые дополнительные функции (АПВ и защита от замыканий на землю), и поэтому в использовании других реле нет необходимости[20].

Применение дистанционной защиты в распределительных сетях имеет ряд рассматриваемых ниже особенностей.

Линии с неоднороднымм сопротивлениями

Обычно линии состоят из отдельных участков с различными техническими данными: различные сечения проводников и геометрия опор, различные типы кабелей, смешанные участки воздушных и кабельных линий, токоограничивающие реакторы, и т.д.

Различие углов сопротивлений КЗ может быть значительным (например, 20° у кабельной линии и 87° — у реактора). В этом случае рекомендуется представить на комплексной плоскости всю линию (рис. 5.20).

Сопротивления воздушных линий можно просто суммировать, т. к. углы полного сопротивления линии равны приблизительно 70° для сечений 95 мм^2 и выше.

Трансформаторы напряжения на шинах

Иногда по экономическим соображениям на шинах подстанций в сетях среднего напряжения устанавливается один общий ТН. При отключении ТН дистанционные защиты на всех фидерах должны быть блокированы. При использовании цифровых дистанционных защит 7SA6 в этом случае возможно автоматическое переключение на использование токовой защиты.

Если трансформаторы напряжения защищаются плавкими предохранителями и подача сигнала об отказе невозможна, то в защите 7SA6 должен использоваться токовый пуск при междуфазных повреждениях. Комбинированный пуск по току и напряжению разрешается только при появлении тока в земле. Таким способом можно избежать ложного срабатывания при перегорании плавкого предохранителя ТН.

Разветвлённые линии

Когда линии являются разветвлёнными, что особенно характерно для сельской местности, точно определить положение точки короткого замыкания по сопротивлению цепи КЗ практически невозможно, и поэтому на диаграмме полных сопротивлений необходимо представить «дерево» всей системы (см. 3.1.13, расстояние до точки замыкания).

[20] Для защиты от замыканий на землю применяется направленная/ненаправленная токовая защита в заземленных системах или чувствительная направленная защита, измеряющая активную/реактивную мощность. В разветвленных сетях с изолированной / компенсированной нейтралью определение направления замыкания на землю должно осуществляться в соответствии с принципом определения направления волны переходного процесса. Для это необходимо дополнительное устройство 7SN71.

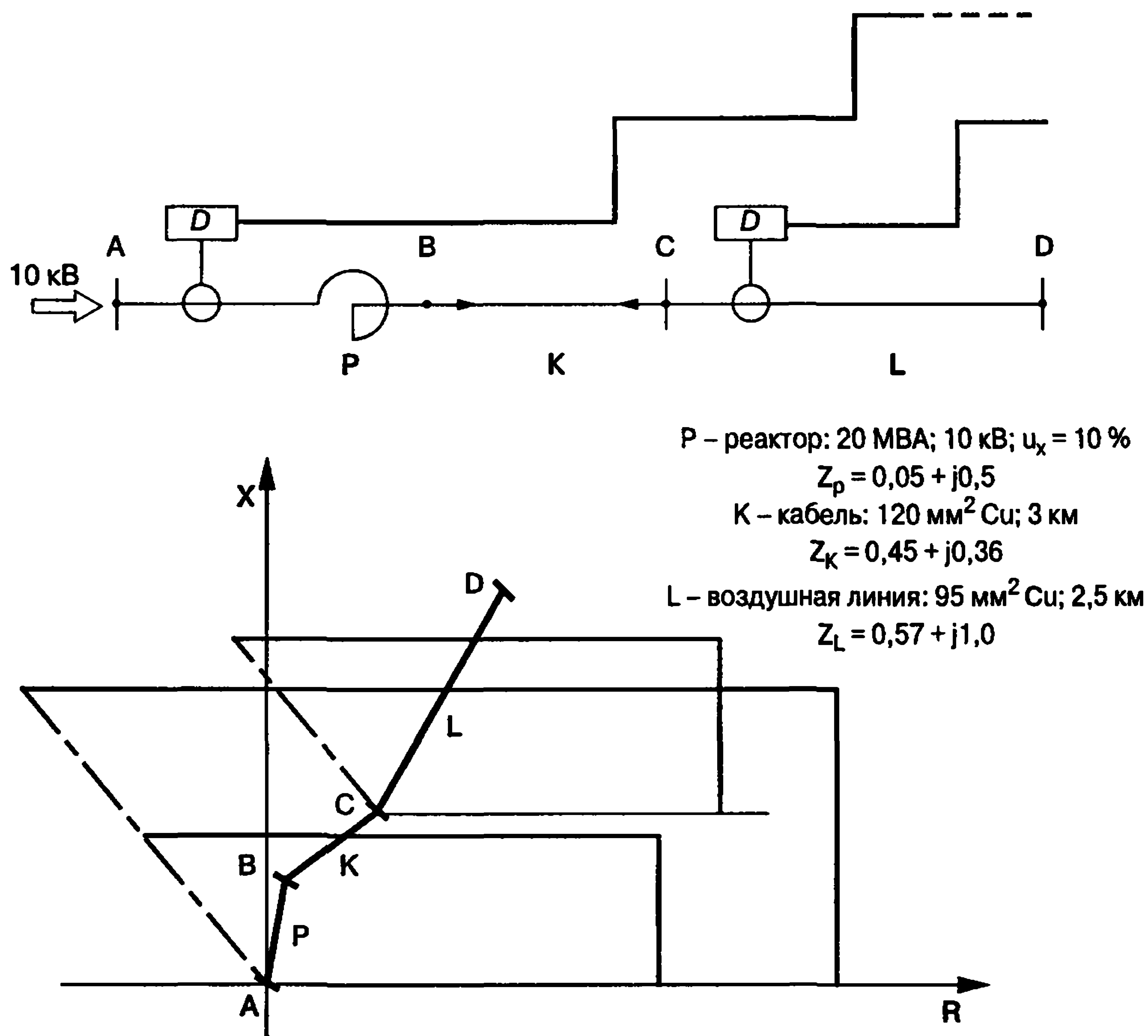


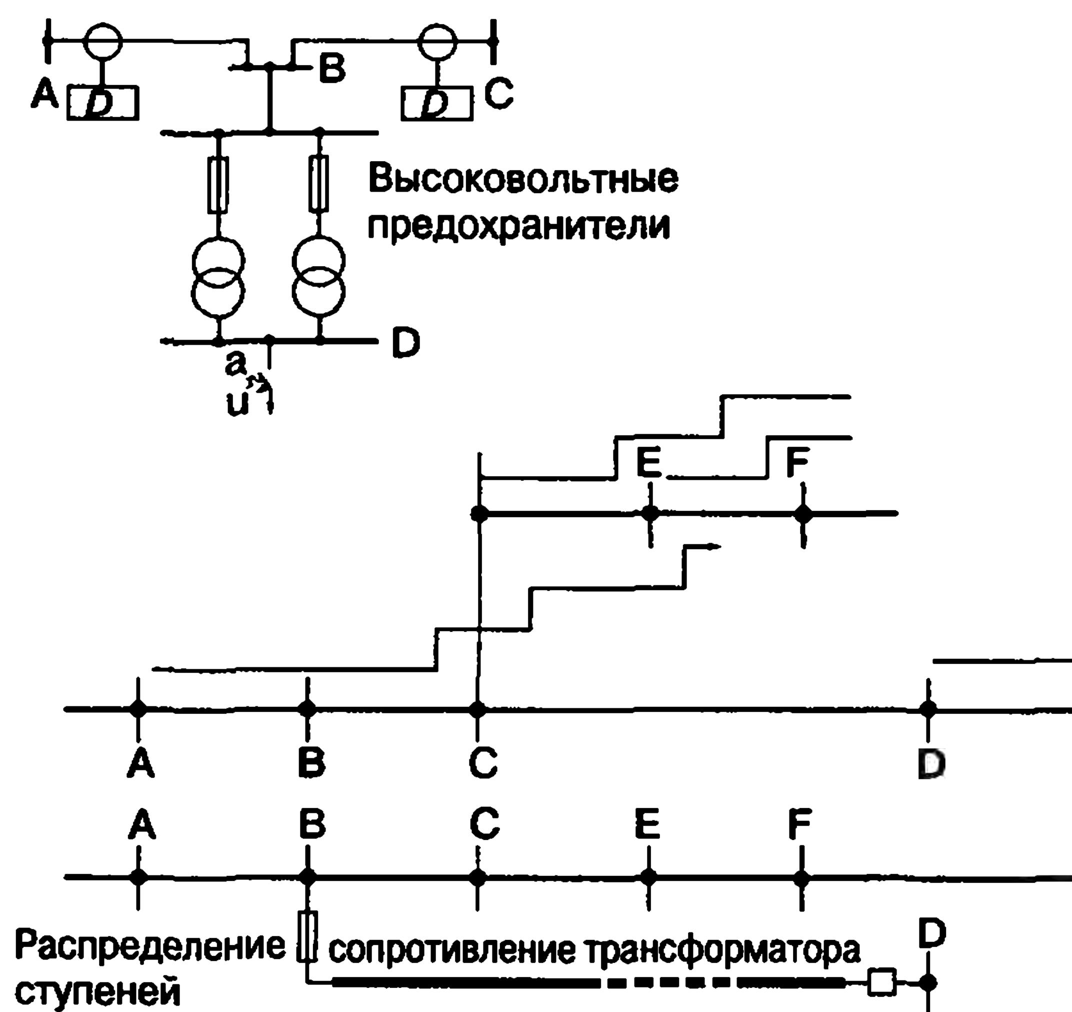
Рис. 5.20. Диаграмма сопротивлений участков линии в сети среднего напряжения

Распределение подстанций потребителей по линии

Обычно маломощные трансформаторы потребителей подключаются непосредственно к линии через плавкие предохранители (рис. 5.21). В этом случае уставка первой ступени может соответствовать (85—90 %) расстояния между точками А и С, т. к. сопротивление небольших трансформаторов велико по сравнению с полным сопротивлением линии. Соответственно, первая ступень будет срабатывать только при повреждениях в обмотках трансформаторов со стороны ВН.

Замыкания в сети низкого напряжения фиксируются второй ступенью со временем 0,3—0,4 с. Этим обеспечивается достаточная ступень выдержки времени для того, чтобы дать возможность плавким предохранителям и выключателям на стороне низкого напряжения отключить замыкание. При благоприятных условиях КЗ, близкие к выводам трансформатора, отключаются высоковольтными предохранителями при протекании по ним начального тока КЗ ещё до срабатывания защиты. При более медленном отключении предохранителями повреждений в трансформаторе, сопровождающихся небольшими токами КЗ, считается допустимым отключение линии. Такое событие, однако, маловероятно.

При большей номинальной мощности трансформатора (> 1 МВА) и более длин-



Сопротивление трансформатора: $X_{тр} = (u_к\%/100\,\%) \cdot \dfrac{U^2_{ном}[кВ]}{S_{ном}[МВА]}$

Пример:
$S_{ном}$ = 630 кВА = 0,63 МВА
$U_{ном}$ = 10 кВ, $u_к$ = 4 %

$$X_{тр} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10^2}{0{,}63} = 6{,}35 \text{ Ом}$$

Сопротивление двух параллельных трансформаторов соответствует сопротивлению кабелей:

120 мм² Cu-кабель: $l = \dfrac{6{,}35}{2 \cdot 0{,}2} \approx 16$ км

35 мм2 Cu-кабель: $l = \dfrac{6{,}35}{2 \cdot 0{,}5} = 6$ км

Рис. 5.21. Линия с трансформаторной подстанцией, уставки дистанционной защиты

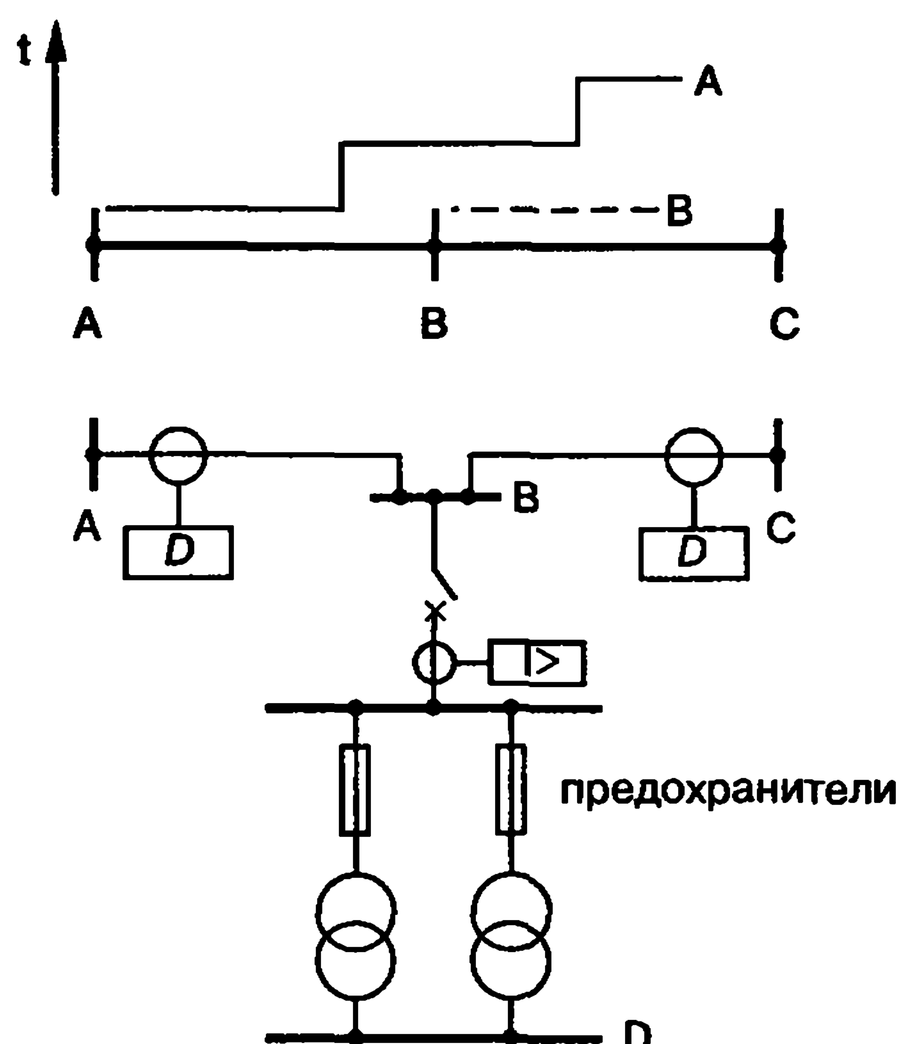
ных линиях возможно, что сопротивление трансформатора окажется меньше, чем сопротивление участка В-С. В этом случае уставка ступени должна быть соответственно уменьшена и отстроена от реактивного сопротивления трансформатора.

Если у потребителя установлен выключатель с максимальной токовой защитой, то дистанционная защита должна быть с ней согласована (рис. 5.22). Это гарантирует селективное отключение КЗ в сети потребителя, в то время как питающая линия не отключается.

Если к линии напрямую (без трансформатора) подключена небольшая промышленная сеть, то, возможно, потребуются большие выдержки времени (рис. 5.23). Для того, чтобы при КЗ в кольцевой кабельной сети сохранить частично питание потребителей, выключатель E должен без выдержки времени разделить кольцо на две радиальных линии. Выдержки времени максимальных токовых защит на выключателях B2 и B3 соответственно должны быть увеличены на одну ступень и составлять 0,5 с. Защита, установленная на выключателе B1 потребителя, должна иметь III ступень с выдержкой времени 0,9 с. Тогда вторая ступень дистанционной защиты D (на п/ст A) должна иметь выдержку времени приблизительно 1,3 с.

Промежуточные источники питания

В сетях среднего напряжения промежуточные источники питания всегда имеют большое значение. Небольшие электростанции (гидроэлектростанции, ветровые электростанции и т.д.) в большинстве случаев подключаются непосредственно к линии. При достаточной их мощности



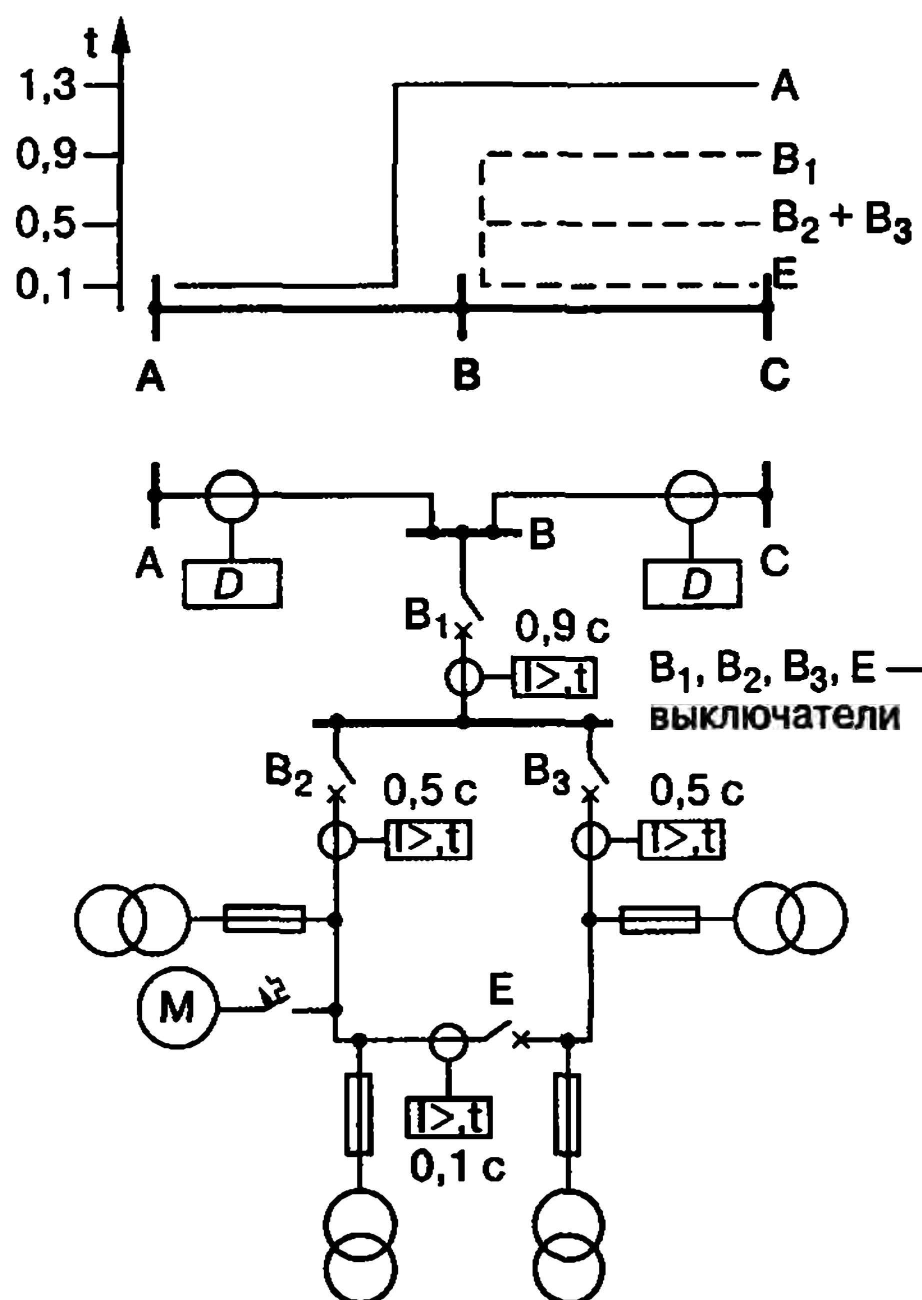


Рис. 5.22. Уставки дистанционных защит линий при подключении потребителя собственным выключателем

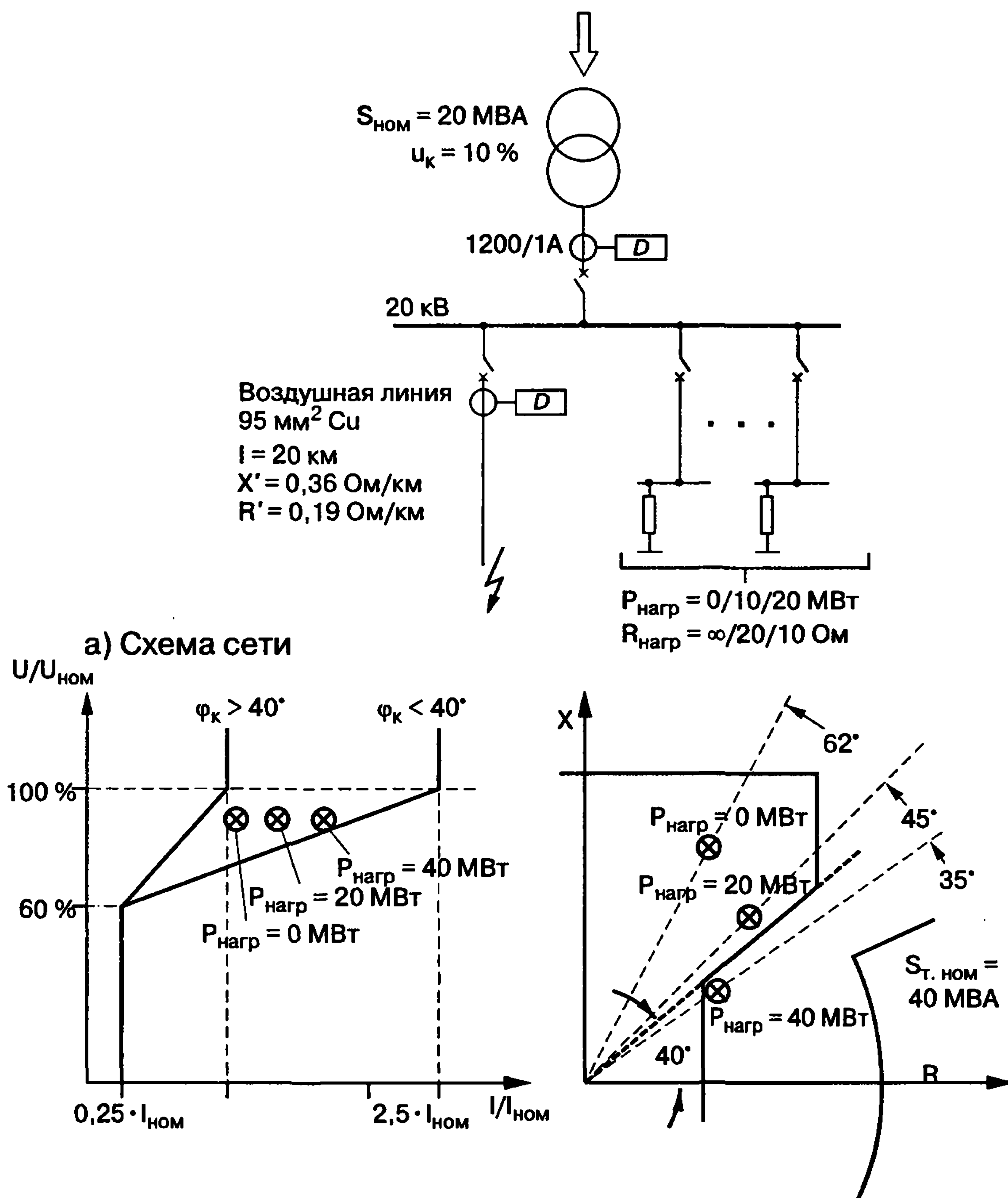
Рис. 5.23. Уставки ступеней дистанционной защиты линии при подключении к линии промышленной сети

(по отношению к мощности КЗ) может появиться необходимость учёта влияния промежуточной подпитки при выборе уставок защиты (см. п.п. 3.5.2). При применении АПВ должно быть обеспечено отключение промежуточного источника на время существования замыкания на линии. Если же источник не будет отключен, и ток в месте КЗ останется выше порогового значения тока горения дуги, погасание дуги во время бестоковой паузы АПВ не произойдёт. Поэтому в комплект защиты децентрализованного генератора должны входить реле частоты и реле минимального напряжения [5.25, 5.26. 5.27].

Проблемы пуска резервной защиты

Определение области действия пусковых органов, выполняемых в виде максимальных токовых защит и защит с комбинированным пуском по напряжению, было рассмотрено в п.п. 3.1.6.

При отказе срабатывания защиты или выключателя на линии возникает необходимость установки на шинах источника питания ступенчатой защиты с выдержкой времени для выполения ею функций резервной (рис. 5.24). Максимальная токовая защита (токовый пуск) на шинах источника питания должна иметь уставку, которая будет выше, чем максимальный допустимый ток перегрузки трансформатора (обычно $1{,}3 \cdot 2 \cdot I_{ном}$), и поэтому может оказаться недостаточно чувствительной. Сложная ситуация может сложиться, если замыкание значительно удалено или произошло на линии с маленьким поперечным сечением провода. В обоих случаях ток КЗ значительно ограничен и напряжение снижается незначительно, особен-



б) $U/I/\varphi$ направленный пуск. в) Пуск по сопротивлению

Рис. 5.24. Пуск резервной защиты

но, если номинальная мощность трансформатора велика. Это означает, что использование реле с комбинированным пуском также не решит эту проблему. Использование реле с направленным пуском или с пуском по сопротивлению, которое дополнительно оценивает угол тока КЗ, обычно позволяет решить эту проблему. Для медных проводов угол тока короткого замыкания больше 60° при сечении провода 95 мм² и больше (для алюминиевых проводов угол более 45°). Однако, угол сопротивления поврежденной линии не является абсолютно определяющим, т. к. токи нагрузки других линий накладываются на измеряемый ток. Это представлено на рис. 5.24. В этом случае угол тока КЗ снижается из-за передачи по линиям активной мощности ($0{,}5\,S_{\text{ном тр-ра}}$) с 62° до 51°. При уставке 40° срабатывание защиты будет надежно обеспечено. Если вся нагрузка трансформатора является ак-

тивной и равна номинальной, то угол снижается до 35°, что ниже, чем значение уставки.

В заключение необходимо заметить, что направленный пуск или пуск по сопротивлению позволяют расширить область действия защиты в случае больших углов, характерных для линий сверхвысокого напряжения (70° и больше). Для линий среднего напряжения это не характерно, за исключением медных и алюминиевых проводов с большим поперечным сечением. Из-за влияния токов нагрузки чувствительность значительно снижается. В любом случае, эффективность необходимо проверять расчётами в нормальных и аварийных режимах [5.28].

В настоящее время цифровые устройства, предназначенные для распределительных сетей (7SA6), также имеют орган для направленного пуска или пуска по сопротивлению, обеспечивающие благоприятные условия для пуска.

А что делать, если даже использование направленного пуска не решает эту проблему?

В крайнем случае, на отходящих линиях должны быть установлены защита от отказа выключателя и резервная защита. Функция защиты от отказа выключателя включена в цифровые реле и отдельную резервную защиту в распределительных сетях можно не устанавливать благодаря функции постоянной самодиагностики.

При несимметричных замыканиях для обеспечения срабатывания последней («финальной») ступени защиты на шинах источника питания можно использовать измерение составляющих обратной последовательности и тока в земле. Но при трёхфазных замыканиях отключение не обеспечивается.

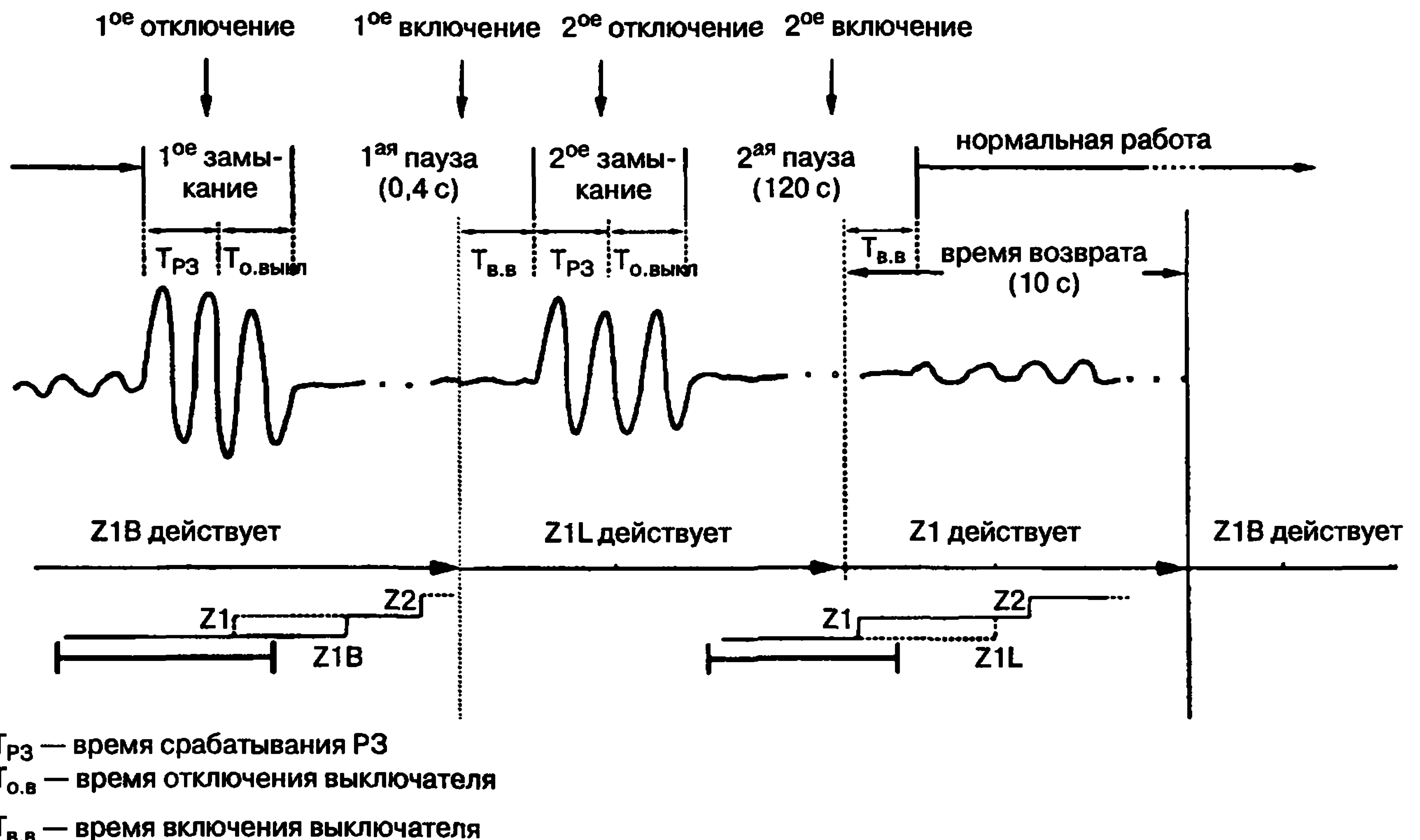


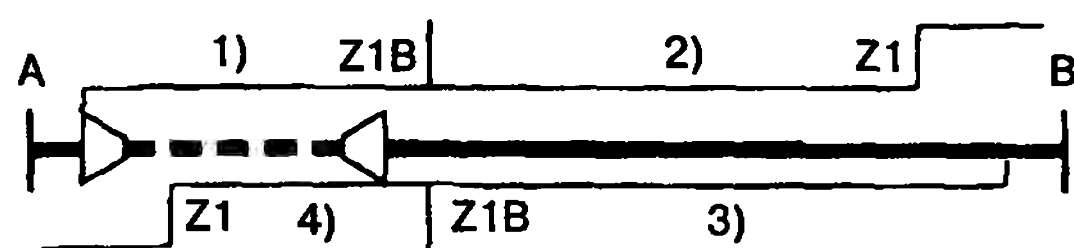
Рис. 5.25. АПВ с маленькими и большими выдержками времени (RAR, DAR)

Многократное АПВ

В сетях среднего напряжения около 60—70 % всех КЗ исчезает за время бестоковой паузы АПВ, соответствующей примерно 0,3—0,5с.

В большинстве случаев после неуспешного первого АПВ производится повторное АПВ с большим временем паузы (порядка нескольких минут) DAR (замедленное АПВ) и RAR (ускоренное АПВ) в сельской местности. Опыт показал, что таким образом может быть отключено 40 % замыканий после неуспешного АПВ.

В цифровых дистанционных реле 7SA6 могут быть установлены различные характеристики полного охвата для циклов RAR и DAR (рис. 5.25). Отключение первоначального замыкания обычно достигается ступенью с излишним охватом без выдержки времени (управлямая ступень Z1B с T1B = 0). Уставки, используемые в последующих циклах АПВ, могут отличаться от тех, которые были в предшествующем первому циклу режиме (например, Z_{1L}, T_{1L}) или устанавливаются уставки, соответствующие обычным ступенчатым характеристикам. Таким образом достигается селективность итогового отключения, если замыкание находится на смежных линиях. Однако, тогда необходимо учитывать, что замыкания, близкие к удаленному концу своего участка, также будут устраняться с большой выдержкой времени.



Подстанция А:

1) до Z1B — АПВ блокировано
2) за Z1B — АПВ разрешено

Подстанция В:

3) до Z1B — АПВ разрешено
4) за Z1B — АПВ блокировано

воздушная линия

кабель

Рис. 5.26. Селективное АПВ на кабельно-воздушном участке линии

АПВ на секциях линии

На линиях, которые состоят из воздушных и кабельных секций, АПВ должно производиться только, если замыкание находится на воздушной линии.

При использовании цифровых реле 7SA6 это достигается с помощью перекрытия зон действия двух ступней с разными уставками (Z1B и Z1 на рис. 5.26) и определенной логикой соединения выходов.

5.2.2. Дистанционная защита в сетях с компенсированной или изолированной нейтралью

Большое сопротивление заземления нейтральной точки требует особого учёта при использовании дистанционной защиты для работы при замыканиях на землю.

Однофазные замыкания на землю

В этом случае однофазные замыкания не считаются короткими замыканиями, т. к. в земле протекают только небольшие ёмкостные или компенсированные токи [5.29]. Благодаря ограничению или компенсации тока в большинстве случаев происходит самоустранение повреждения (кратковременное замыкание на землю). В случае установившегося замыкания на землю линия может оставаться включённой в работу в течение до нескольких часов, пока место замыкания не будет обнаружено и повреждённая линия

не будет отключена. Для сигнализации о замыкании на землю используется направленная чувствительная защита от замыканий на землю. Дистанционная защита при этом не должна срабатывать.

Это должно быть обеспечено использованием соответствующего органа для определения замыкания на землю. Разрешение дистанционных измерений приведёт к неконтролируемому излишнему отключению, т. к. напряжение на поврежденной фазе в случае установившегося металлического замыкания на землю может быть равно нулю во всей гальванически связанной сети. Соответственно, сопротивление, измеренное по току нагрузки, будет равно нулю.

Двойные замыкания на землю

Из-за повышения фазного напряжения здоровых фаз в $\sqrt{3}$ раз во всей сети могут возникнуть двойные замыкания на землю. В итоге возникает ситуация, аналогичная двухфазному замыканию, однако, ток от одного места замыкания до другого протекает по земле. Второе замыкание может находиться в любом другом месте гальванически связанной системы, в зависимости от того, где расположена точка с наиболее ослабленной изоляцией.

Вероятность двойного замыкания повышается при увеличении размеров сети [5.29]. В том случае, когда две точки замыкания расположены в непосредственной близости друг от друга, значения токов будут иметь тот же порядок, что и значения токов двухфазных КЗ. В то же самое время, если замыкания удалены друг от друга, то ток замыкания может быть ниже номинального.

Стратегия защиты от двойных замыканий заключается в том, что одно из замыканий отключается для того, чтобы второе могло самоустраниться так же, как это происходит при однофазном замыкании, или могло быть отключено вручную после его успешного обнаружения. Для этого дистанционные защиты в системах с компенсированной/изолированной нейтралью должны иметь функцию так называемого фазного предпочтения при двойных замыканиях, которая для проведения измерений во всей гальванически связанной сети выбирает либо опережающую фазу, либо отстающую. Эта функция работает только на тех линиях, которые расположены между двумя точками замыкания, т. к. только на этом участке протекает ток в земле, необходимый для определения двойного замыкания. На питающей линии, вне этого участка, протекает либо очень маленький ток в земле, либо его совсем нет, и пусковой орган определяет двухфазное замыкание и, поэтому, выбирает соответствующий междуфазный контур для проведения измерений. Обычно в этих случаях отключение осуществляется ступенью с выдержкой времени, часто самой последней («финальной») ступенью, из-за неполного охвата защищаемой зоны первой ступенью дистанционной защиты (границы определения двойного замыкания будут подробно рассмотрены ниже).

Преднамеренное отключение обоих замыканий на землю многосистемной дистанционной защитой производится только в исключительных случаях в сетях высокого напряжения с компенсированной нейтралью.

Дистанционные измерения при двойных замыканиях на землю

Контур замыкания состоит из внутреннего участка сети, расположенного между двумя точками замыкания, и нескольких внешних прилегающих участков, расположенных между источниками питания и

ближайшими к ним точками замыкания. Это представлено на рис. 5.27 для линии с односторонним питанием.

Ток замыкания определяется линейной ЭДС (на рис.: $\underline{E}_B - \underline{E}_C$), имеет фазное соотношение такое же как и при двухфазном КЗ. Благодаря соединению с землёй измерения можно проводить в трёх контурах: междуфазный контур, а также контуры «фаза—земля» для отстающей и опережающей фаз.

На участке между двумя точками замыкания при проведении измерений в контуре фаза—земля полное сопротивление до точки замыкания определяется правильно.

Для реле Р2:

$$\underline{Z}_B'' = \frac{\underline{U}_B''}{\underline{I}_B'' - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E''} = -\underline{Z}_{L2}, \qquad (5.34)$$

где

$$\underline{k}_E = \frac{\underline{Z}_{E2}}{\underline{Z}_{L2}}.$$

$$\underline{Z}_C'' = \frac{\underline{U}_C''}{\underline{I}_C'' - \underline{k}_E \cdot \underline{I}_C''} = \underline{Z}_{L3}, \qquad (5.35)$$

где

$$\underline{k}_E = \frac{\underline{Z}_{E3}}{\underline{Z}_{L3}}.$$

Измерения в контуре фаза—фаза на участке между двумя точками замыкания дают неверный результат, т. к. фазные токи здесь относятся к разным контурам замыканий.

Для реле Р1, расположенного на шинах источника питания, получаем:

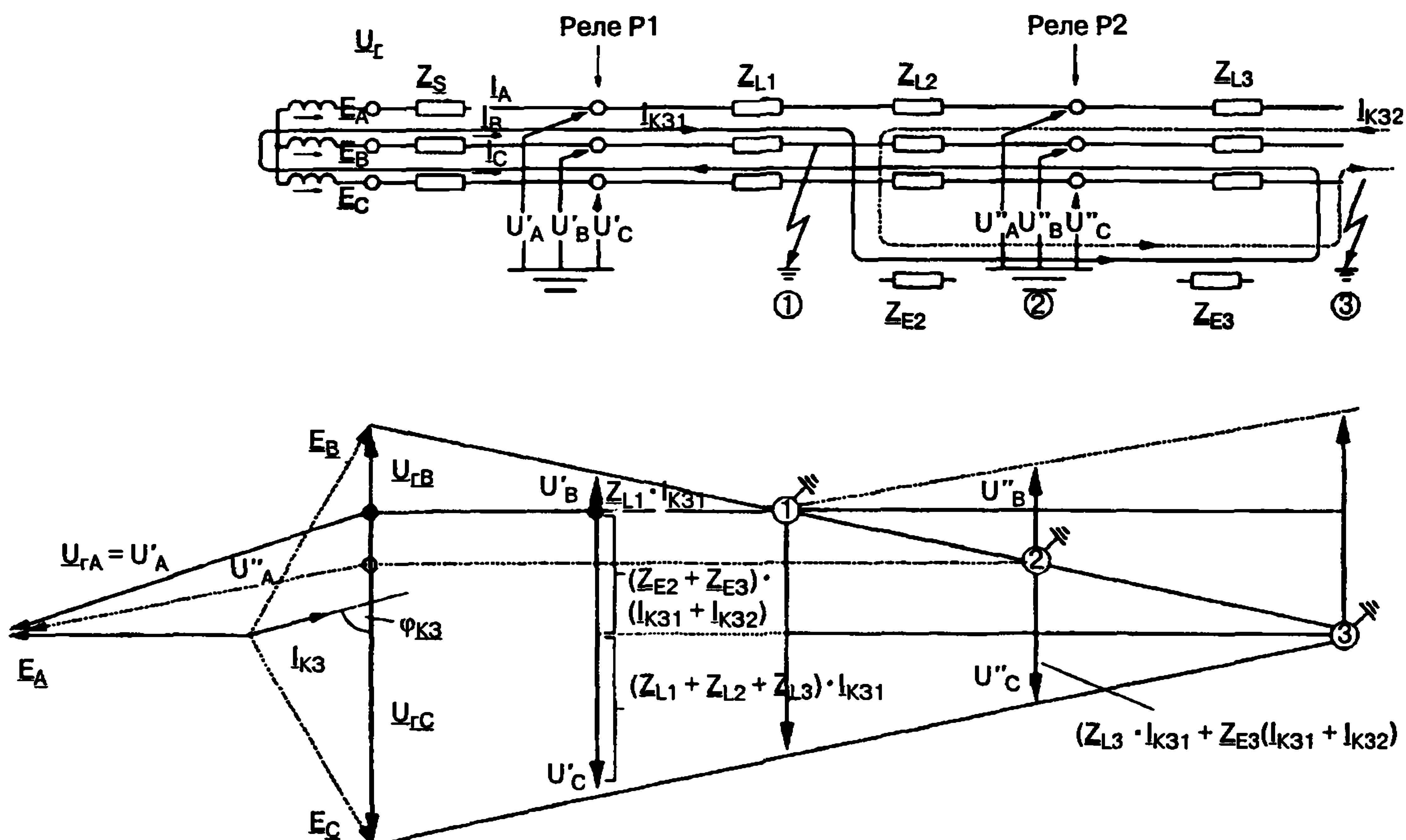


Рис. 5.27. Двойное замыкание на землю, распределение токов и напряжений

$$\underline{Z}'_B = \frac{\underline{U}'_B}{\underline{I}'_B - \underline{k}_E \cdot \underline{I}'_E} = \underline{Z}_{L1} \qquad (5.36)$$

$$\underline{Z}'_C = \frac{\underline{U}'_C}{\underline{I}'_C - \underline{k}_E \cdot \underline{I}'_C} = \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2} + \underline{Z}_{L3} +$$

$$+ (\underline{Z}_{E2} + \underline{Z}_{E3})\left(1 + \frac{\underline{I}_{K32}}{\underline{I}_{K31}}\right), \qquad (5.37)$$

$$\underline{Z}'_{B\text{-}C} = \frac{\underline{U}'_B - \underline{U}'_C}{\underline{I}'_B - \underline{I}'_C} = \underline{Z}_{L1} + \frac{\underline{Z}_{L2} + \underline{Z}_{L3}}{2} +$$

$$+ \frac{\underline{Z}_{E2} + \underline{Z}_{E3}}{2}\left(1 + \frac{\underline{I}_{K32}}{\underline{I}_{K31}}\right). \qquad (5.38)$$

Правильное значение сопротивления получается только при проведении измерений в контуре В-земля, в результате которых определяется значение полного сопротивления до ближайшей точки замыкания. Сопротивление, полученное в результате измерений в контуре С-земля, получается слишком большим из-за падения напряжения при протекании тока в земле. Эффект неполного охвата связан с протеканием тока замыкания от удалённого конца.

В результате междуфазных измерений получаем среднее значение между сопротивлениями контуров двух замыканий. В распределительных сетях можно предположить, что сопротивления земли и проводников приблизительно равны сопротивлениям воздушных линий без заземляющих проводников. Из-за источника питания, расположенного на противоположном конце, измеряемое сопротивление увеличивается, и область действия защиты в разветвленных сетях всегда оказывается слишком маленькой.

Принятый способ работы при двойных замыканиях на землю

В переключаемых защитах, находящихся в настоящее время в эксплуатации, измерения производятся для петли фаза—фаза без пуска током нулевой последовательности. Поэтому сопротивление, измеряемое вне участка между двумя точками замыкания, оказывается слишком большим. Следовательно, можно ожидать, что защита будет срабатывать с большими выдержками времени. Эта ситуация является благоприятной, так как междуфазные измерения не включают в себя функцию выбора замыкания на землю. Реле, которые расположены вблизи места замыкания, обычно измеряют достаточный ток в земле и выбирают предпочтительную фазу. Реле, расположенные на повреждённых линиях, в большинстве случаев измеряют сопротивление правильно, и отключение производится либо первой ступенью без выдержки времени, либо второй ступенью.

Выбор фаз производится в соответствии с прямым или обратным их чередованием.

В распределительных сетях практически всегда рассматривается прямое чередование, поскольку необходимо только определение замыкания в двух фазах и наличие тока земле. В большинстве случаев для обеспечения фазного предпочтения С-до-А-до-В (или «С (А) прямое») используются пусковые органы $I_{>A}$, $I_{>C}$ и $I_{E>}$. В этом случае выбираются контуры:

Двойное замыкание	Предпочтительный контур
А-В-Земля	А-Земля (А-Е)
В-С-Земля	В-Земля (В-Е)
С-А-Земля	С-Земля (С-Е)

В сетях высокого напряжения дистанционная защита всегда имеет трёхфазный пуск. Поэтому здесь используется обратное чередование при определении фазного предпочтения, например, А-до-С-до-В-до-А (или «А(С) обратное»).

В этом случае выбираются следующие контуры:

Двойное замыкание	Предпочтительный контур
A-B-Земля	B-Земля (B-E)
B-C-Земля	C-Земля (C-E)
C-A-Земля	A-Земля (A-E)

Фазное предпочтение должно быть одинаковым во всей системе.

В традиционных переключаемых реле предусматривались жесткие связи и задание уставок с помощью штеккеров, т. е. выбор чередования был однозначным (например, в реле для сети среднего напряжения R1KZ4 только прямое чередование).

В цифровых реле 7SA6 могут быть установлены различные способы фазного предпочтения (при параметрировании).

Дополнительно это устройство позволяет осуществить отключение обоих мест замыкания (уставка фазного предпочтения для двойного замыкания на землю — «Все»).

Границы определения двойного замыкания

Уже упоминалось о том, что в защите со стороны источника питания, где ток в земле не протекает, фазное предпочтение при двойном замыкании на землю не может иметь место. В этом случае всегда определяется двухфазное замыкание, а следовательно отключение происходит с большей выдержкой времени. В принципе существует другой способ определения двойного замыкания на землю посредством измерения напряжения смещения ($3U_0$), однако, на практике этот способ не применяется.

Двойное замыкание на землю не будет правильно отключено и в случае, когда одно из мест замыкания расположено на отключенном конце фидера (рис. 5.28). В этой ситуации, несмотря на протекание тока в земле, реле всегда будет выбирать повреждённую фазу на отключенной линии, так как обычно на других фазах повреждение не обнаруживается. Желаемое селективное отключение может произойти только, когда повреждение на фидере произошло в фазе, которой отдается предпочтение. В других случаях оба замыкания отключаются одновременно. Одновременное отключение обоих мест замыкания можно ожидать и в том случае, когда замыкания расположены на разных ответвлениях, но в пределах одной ступени дистанционной защиты (рис. 5.29), так как оба реле «видят» только однофазное замыкание на землю.

Возможны так же другие крайние ситуации, в зависимости от схемы сети и расположения мест замыкания относительно друг друга. Использование комбинированного пуска позволяет существенно улучшить селективность, поскольку сочетание снижения напряжения с токами

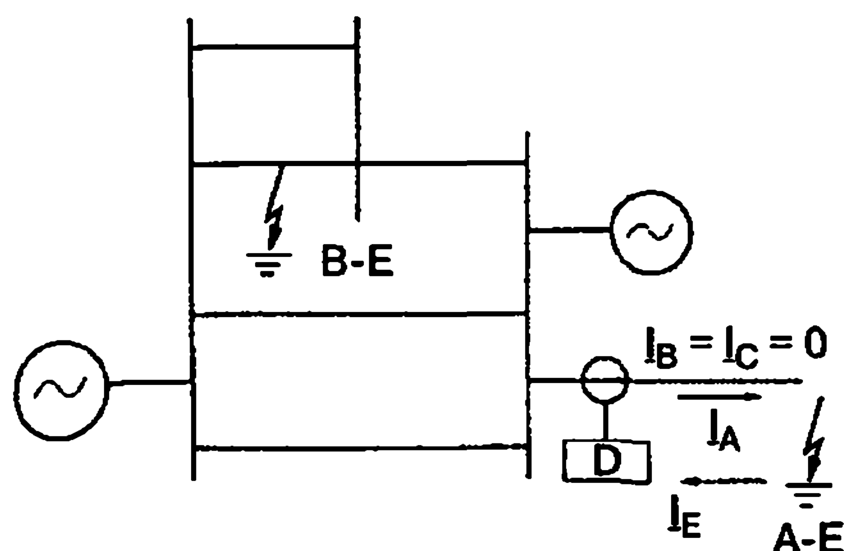


Рис. 5.28. Двойное замыкание на землю, одна из точек замыкания расположена на тупиковой линии

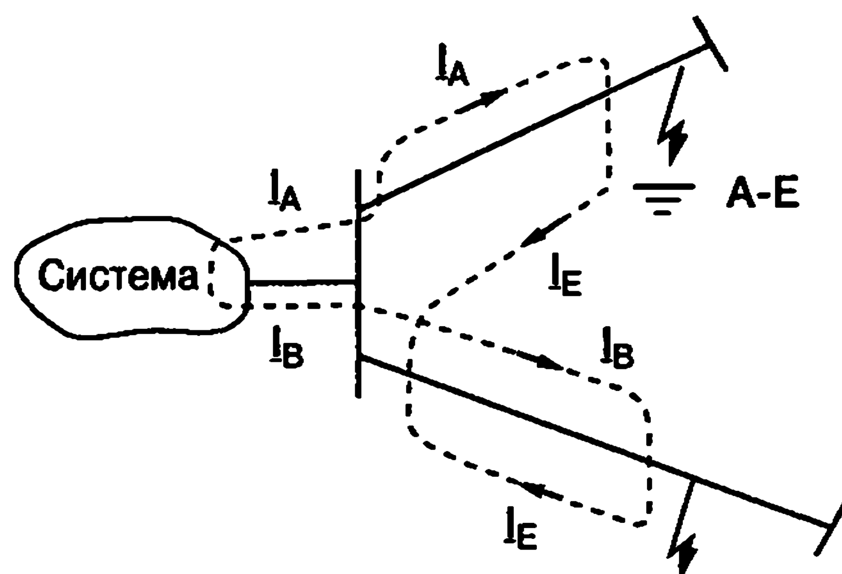


Рис. 5.29. Двойное замыкание на землю. Точки замыканий расположены на различных ответвлениях в пределах одной ступени защиты

нагрузки позволяет определить наличие замыкания даже в том случае, когда токовый пуск его не обнаруживает.

Двойные замыкания на землю на параллельных линиях

В этом случае в схеме замещения нулевой последовательности необходимо учитывать сопротивление взаимной индукции между проводами, как и в заземлённой системе (см. п.п. 3.5.3). Принцип этого влияния хорошо виден на примере двухцепной воздушной линии с односторонним питанием (рис. 5.30).

При расчёте методом симметричных составляющих необходимо помнить, что сумма токов, протекающих в фазных проводниках, всегда возвращается по земле под линией, а не напрямую к месту замыкания на параллельной линии[21].

[21] На самом деле ток течёт напрямую от одной линии к другой, т. к. токи в секции 1 взаимно вычитаются. Если для расчёта в этой секции используются только прямые и обратные токи в фазных проводниках, то действительное расстояние между этими фазными проводниками необходимо использовать как основной параметр при определении сопротивления линии. При этом реактивное сопротивление линии изменяется, обычно увеличивается, по сравнению с сопротивлением прямой последовательности транспонированной трёхфазной линии (см. п.п. 3.5.5).

Сопротивления, измеряемые реле 1 и 2, рассчитываются следующим образом.

Реле 1

$$\underline{U}_{B-E} = l_1(\underline{Z}_L' \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}_E' \cdot \underline{I}_C) - l_1 \frac{\underline{Z}_{0M}'}{3} \underline{I}_{E_п} + l_2(\underline{Z}_L' \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}_E' \cdot \underline{I}_E), \quad (5.39)$$

где $\underline{Z}_{0M}'$ — сопротивление взаимоиндукции линий.

При $I_B = I_E = -I_{E_п} = I_{КЗ}$, $\underline{k}_E = \dfrac{\underline{Z}_E'}{\underline{Z}_L'}$ и $\underline{k}_{EM} = \dfrac{\underline{Z}_{0M}'}{3\underline{Z}_L'}$ получаем:

$$\underline{Z}_{B-E} = \frac{\underline{U}_{B-E}}{\underline{I}_B + \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E} = \underline{Z}_L'\left[(\underline{l}_1 + \underline{l}_2) - \underline{l}_1 \frac{\underline{k}_{EM}}{1 + \underline{k}_E}\right]. \quad (5.40)$$

Реле 2

Аналогичным образом получаем следующее:

$$\underline{Z}_{C-E} = \frac{\underline{U}_{C-E}}{\underline{I}_C + \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E} = \underline{Z}_L' l_1\left[1 - \frac{\underline{k}_{EM}}{1 + \underline{k}_E}\right]. \quad (5.41)$$

По сопротивлению, измеренному реле 2, может быть получено правильное значе-

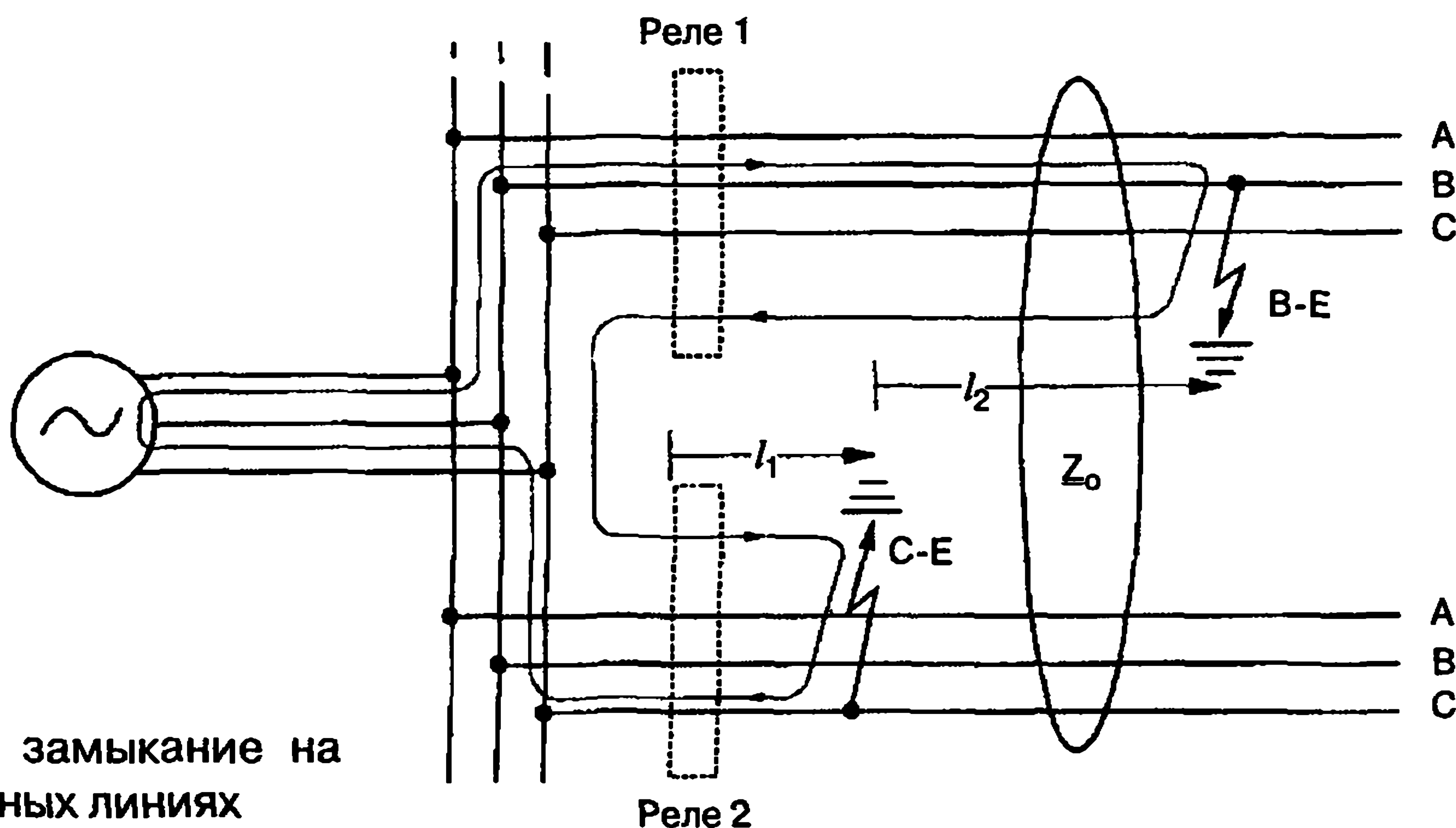


Рис. 5.30. Двойное замыкание на землю на параллельных линиях

ние $\underline{Z}_L' \underline{I}_1$ при помощи компенсации влияния параллельной линии (см. п.п. 3.5.3). Для реле 1 это невозможно, т. к. ток в земле от параллельной линии протекает только в части контура замыкания.

В общем случае возможно значительно более сложное распределение токов, т. к., например, концы линий могут быть гальванически связаны, или на противоположном конце может находиться ещё один источник питания. В зависимости от схемы сети и места расположения реле зоны действия ступеней могут как увеличиваться, так и сокращаться (рис. 5.31). Результаты дистанционных измерений могут быть такими же, как и для систем с заземлённой нейтралью: измеренное сопротивление либо больше действительного, если токи нулевой последовательности в обеих линиях текут в одном направлении (D4, D5), либо меньше, если токи текут в противоположных направлениях (D1, D6). В первом случае это вызывает сокращение защищаемой зоны (неполный охват), во втором — увеличение (излишний охват).

Пример

Оценить ошибку измерений дистанционных реле D3 и D4 (рис. 5.31).

Заданы следующие характеристики двухцепной воздушной линии напряжением 100кВ: $\underline{k}_E = 0{,}84$ и $\underline{k}_{EM} = 0{,}68$.

Решение

Реле D3

Напряжение КЗ в точке установки реле:

$$\underline{U}_{B-E} = \left(\frac{3}{4}\underline{I}_{К3} + \frac{1}{4}\underline{I}_{К3}\underline{k}_E - \frac{1}{4}\underline{I}_{К3}\underline{k}_{EM}\right)\underline{Z}_{LK},$$

где $\underline{Z}_{LK}$ — полное сопротивление линии от места установки реле до точки замыкания фазы В на землю.

Измерения в контуре фаза — земля дают следующий результат:

$$\underline{Z}_{B-E} = \frac{\underline{U}_{B-E}}{\underline{I}_B + \underline{k}_E \cdot \underline{I}_E} = \frac{\underline{U}_{B-E}}{\frac{3}{4}\underline{I}_{К3} + \frac{1}{4}\underline{I}_{К3} \cdot \underline{k}_E} =$$

$$= \underline{Z}_{LK}\left(1 - \frac{\underline{k}_{EM}}{3 + \underline{k}_E}\right).$$

Тогда ошибка

$$F_{D3} = -\frac{\underline{k}_{EM}}{3 + \underline{k}_E} = -\frac{0{,}68}{3 + 0{,}84} = -0{,}18,$$

т. е. −18 %.

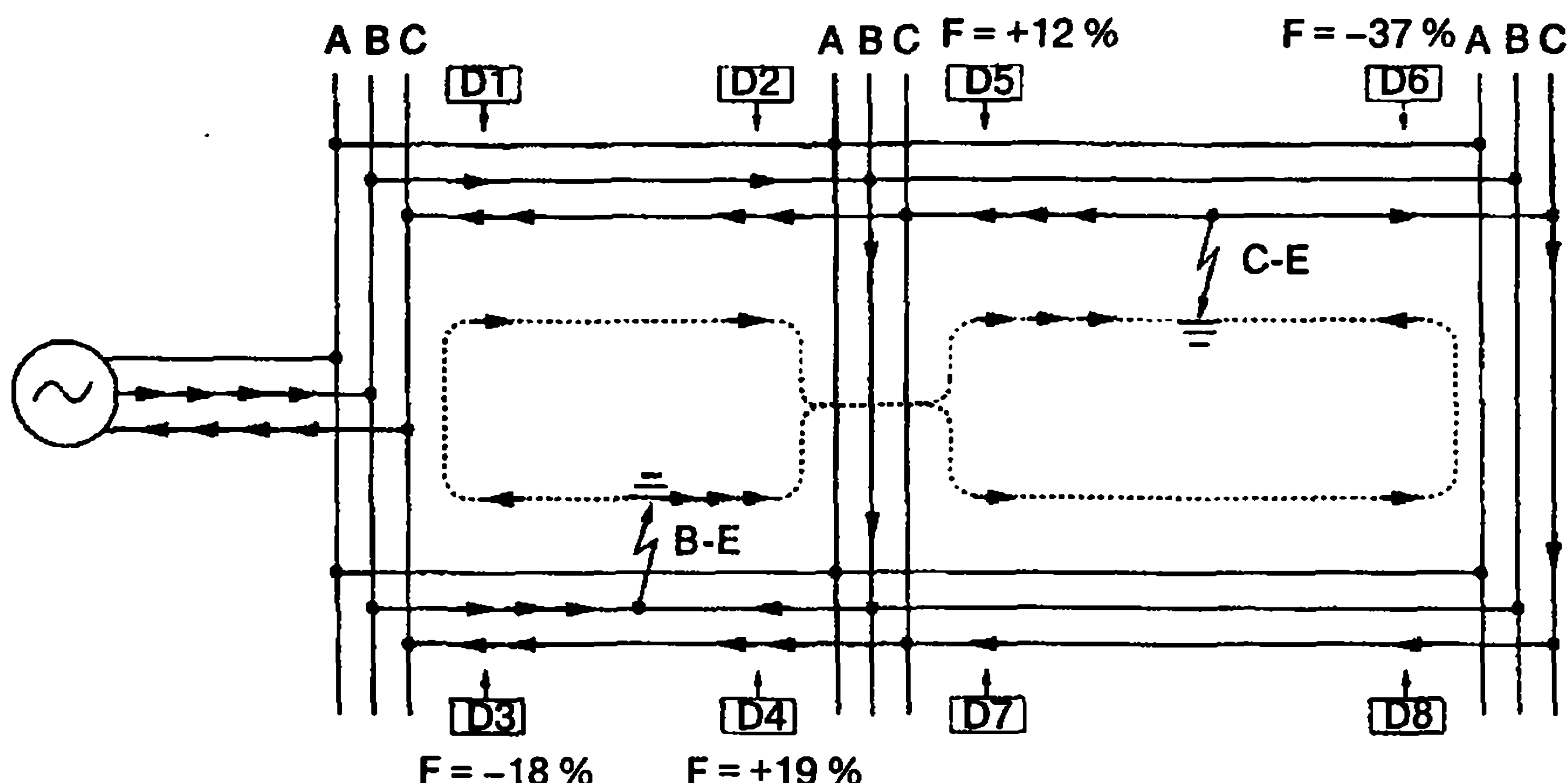


Рис. 5.31. Двухцепная ВЛ, распределение токов при двойном замыкании на землю

При проведении аналогичных расчётов для реле D4 получаем следующие результаты:

$$F_{D4} = \frac{k_{EM}}{1 + 3k_E} = \frac{0,68}{1 + 3 \cdot 0,84} = 0,19,$$

т. е. 19 %.

При использовании компенсации влияния параллельной линии для дистанционной защиты и/или пускового органа для обоих реле получим правильный результат.

В общем случае необходимо заметить, что измерения, произведённые реле на повреждённой линии при использовании компенсации влияния параллельной линии дают правильный результат. В случае, если оба замыкания расположены на одной и той же линии, измерения в контуре фаза—земля верны только для первой точки замыкания (см. рис. 5.30).

Стабилизация защиты при однофазном замыкании на землю

Как было указано выше, дистанционная защита не должена срабатывать при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной/компенсированной нейтралью.

На это необходимо обратить особое внимание в больших сетях со значительными ёмкостными токами. В этом случае амплитуда возникающих при пробое изоляции переходных токов в течение первых полупериодов может многократно превышать номинальный ток с частотой близкой к 50 Гц.

Для того, чтобы предотвратить ложное отключение, в цифровые дистанционные защиты серии 7SA6 заложены алгоритмы, которые позволяют производить определение замыкания в сетях с изолированной/компенсированной нейтралью с некоторой выдержкой времени, равной уставке (например, 40 мс). При возникновении второго замыкания эта функция автоматически отключается. Поэтому пусковой орган срабатывает без выдержки времени, если однофазное замыкание переходит в двойное.

В некоторых случаях некомпенсированные ёмкостные токи в сетях высокого напряжения могут достигать значений более 1000А, т. е. иметь тот же порядок, что и минимальный ток двойного замыкания на землю. Поэтому при использовании тока в земле невозможно отличить ток КЗ от емкостного тока. В этом крайнем случае комбинированный пусковой орган, реагирующий на ток замыкания на землю, не может работать селективно. В реле 7SA6 предусмотрена специальная уставка — «только междуфазные измерения», которая и должна быть установлена. Она разрешает срабатывание только в случае возникновения двойного замыкания на землю, поскольку при однофазном замыкании на землю линейные напряжения не изменяются. При этом можно допустить несколько меньшую чувствительность пускового органа в случае двойного замыкания на землю с большим расстоянием между двумя точками замыканий.

5.2.3. Дистанционная защита в распределительных сетях с низким сопротивлением заземления нейтральной точки

В таких сетях ток в земле обычно ограничивается при помощи резистора или реактора, включённого в нейтральную точку питающего трансформатора ($I_{EK} \leqslant 2000$ А в соответствии с DIN VDE 0141). Как вариант, для заземления нейтральной точки может

быть использован специальный заземляющий трансформатор с Z-обмоткой.

Этот способ заземления обычно применяется в сетях с большим числом кабелей (городские сети) для того, чтобы снизить риск двойного замыкания на землю.

Дистанционная защита может применяться также как и в сетях с глухо заземлённой нейтралью (уставка «нейтральная точка звезды глухо заземлена») для того, чтобы обеспечить срабатывание и при однофазных замыканиях на землю. Если от питающей подстанции отходят только радиальные линии (ответвления), то уровень тока короткого замыкания достаточен для применения пускового органа максимального тока. Однако, ток в земле снижается с увеличением расстояния от точки заземления нейтрали до точки КЗ. Поэтому необходимо проверять значение минимального тока КЗ для большинства удалённых защит.

В разветвлённых сетях дополнительно необходимо учитывать то, что ток в земле распределяется между несколькими линиями, и поэтому в месте установки реле присутствует только часть уже ограниченного тока. Это имеет большое значение для резервных защит (рис. 5.32).

Поэтому в большинстве случаев необходимо использование пуска по сопротивлению или комбинированного пуска. Это позволяет определять замыкания с токами, составляющими примерно 20 % от номинального значения. Соответствующее снижение напряжения обусловлено большим сопротивлением источника из-за ограничения тока в земле.

При ограничении тока с помощью резистора необходимо помнить, что угол между ЭДС источника и током КЗ может быть очень маленьким. Относительно напряжения неповреждённой фазы вектор тока повёрнут в сторону опережения (рис. 5.33). Однако, характеристика направленности с углом наклона, равным 45°, обеспечивает достаточный запас. Проблемы могут появиться только в том случае, если значение ёмкостного тока кабеля имеет тот же порядок, что и ограниченный резистором ток КЗ в земле. В этом случае ток фазы при КЗ на землю повернётся ещё на некоторый угол в сторону опережения. На практике, обычно, таких проблем не возникает, так как в больших сетях сопротивление заземления является реактивным, и токи в земле имеют большое значение (например, 5 кА).

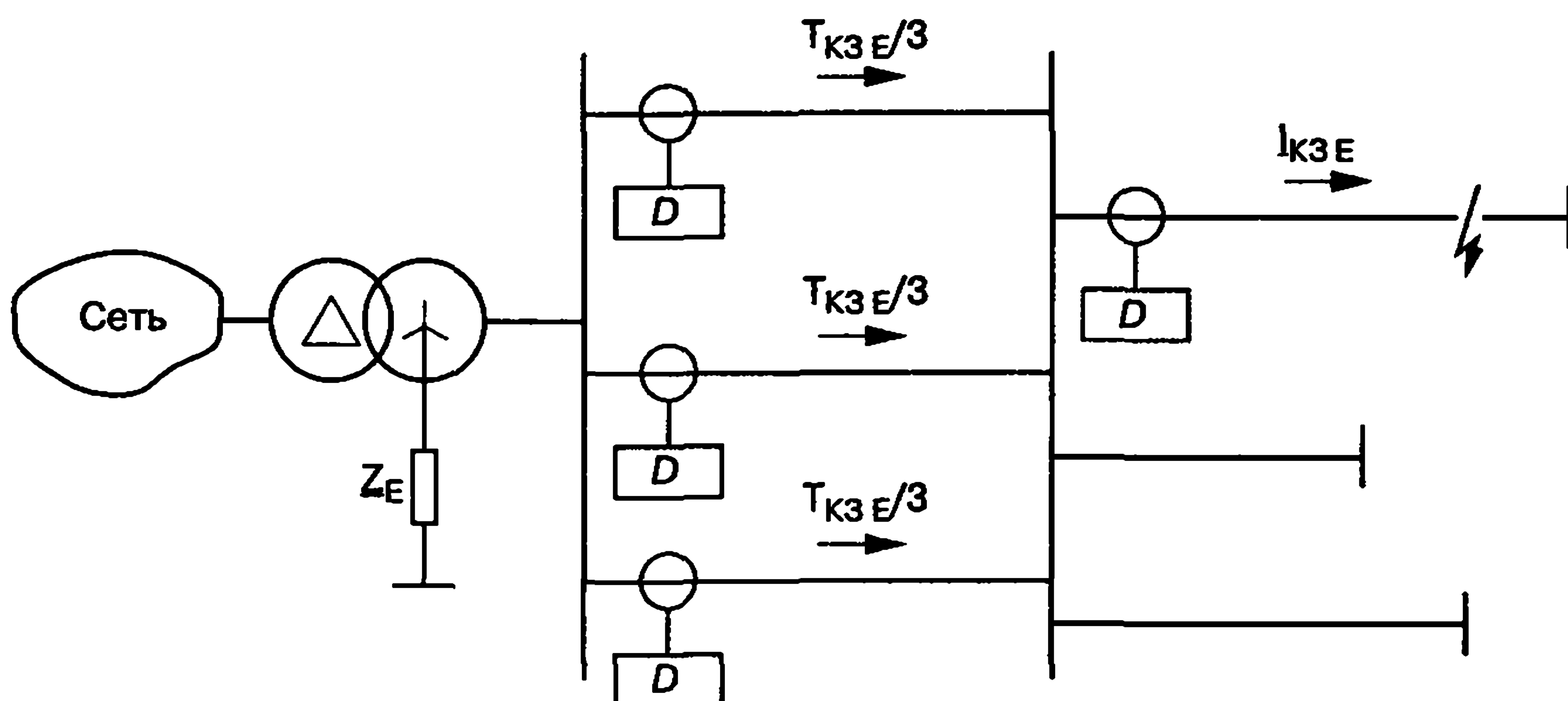
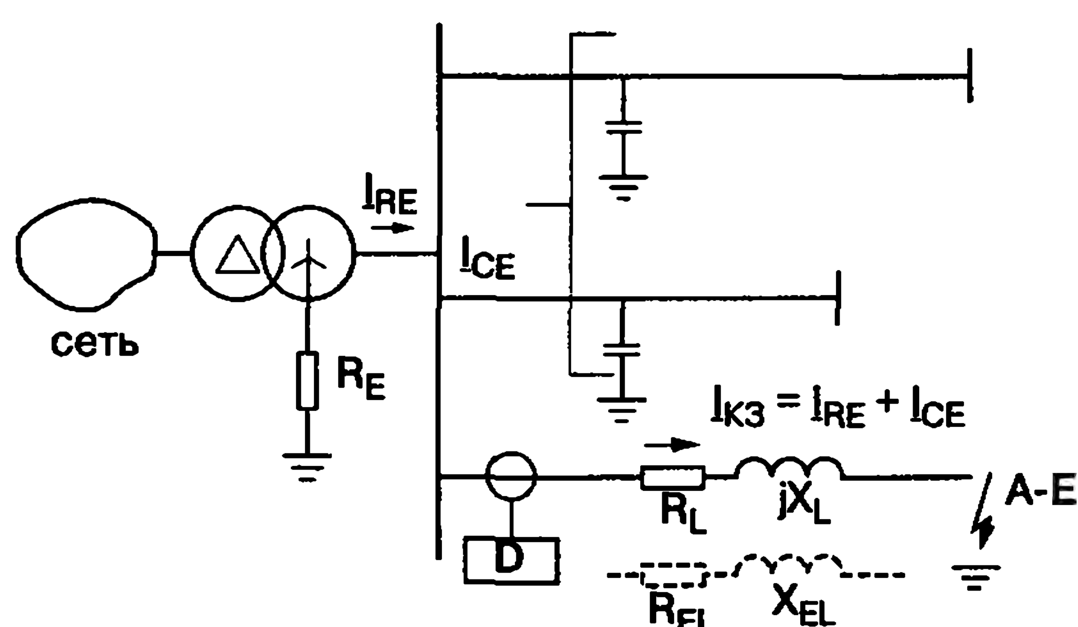


Рис. 5.32. Сеть с низким сопротивлением заземления, распределение тока КЗ в земле

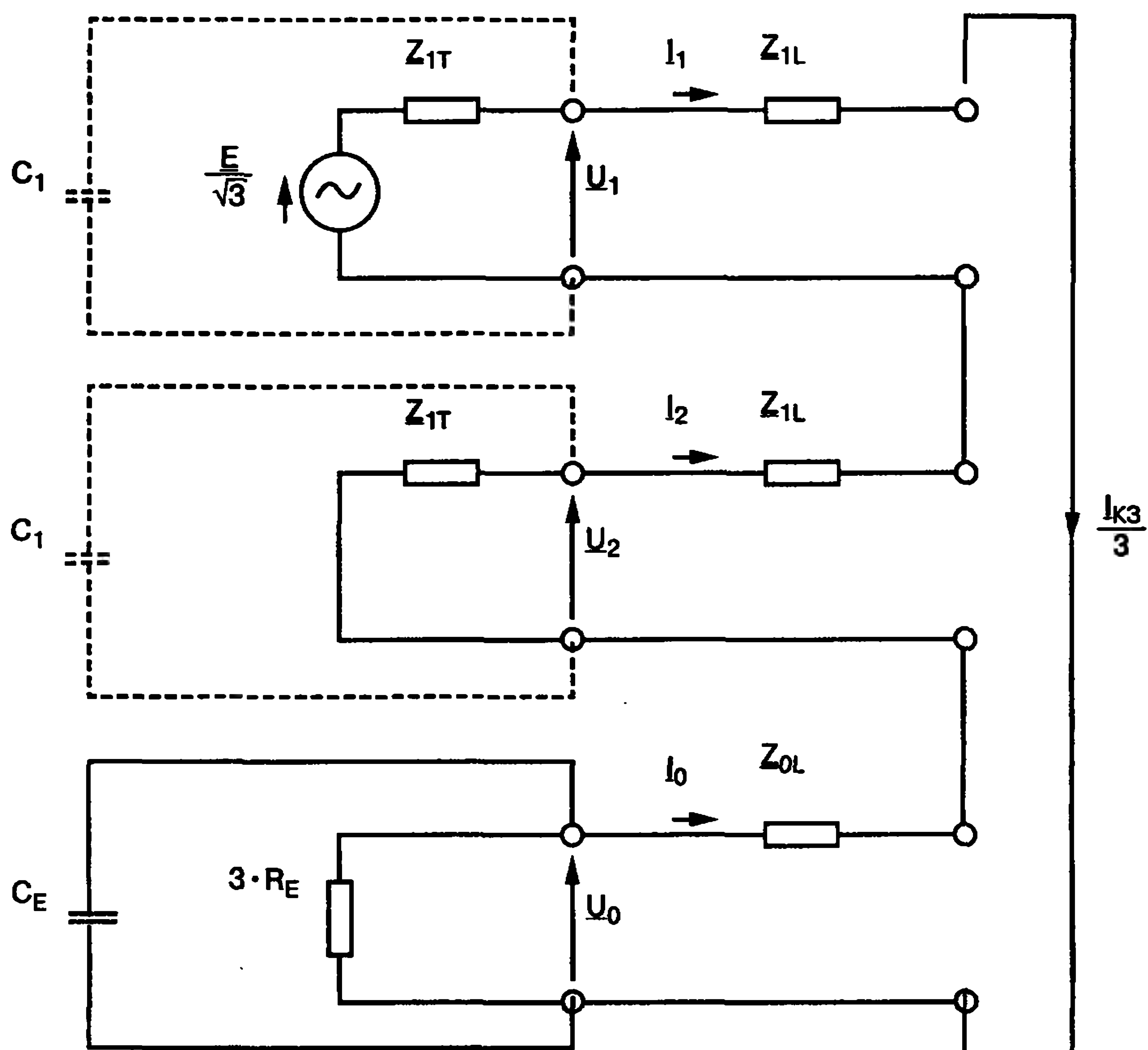


$$I_{RE} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot R_E}$$

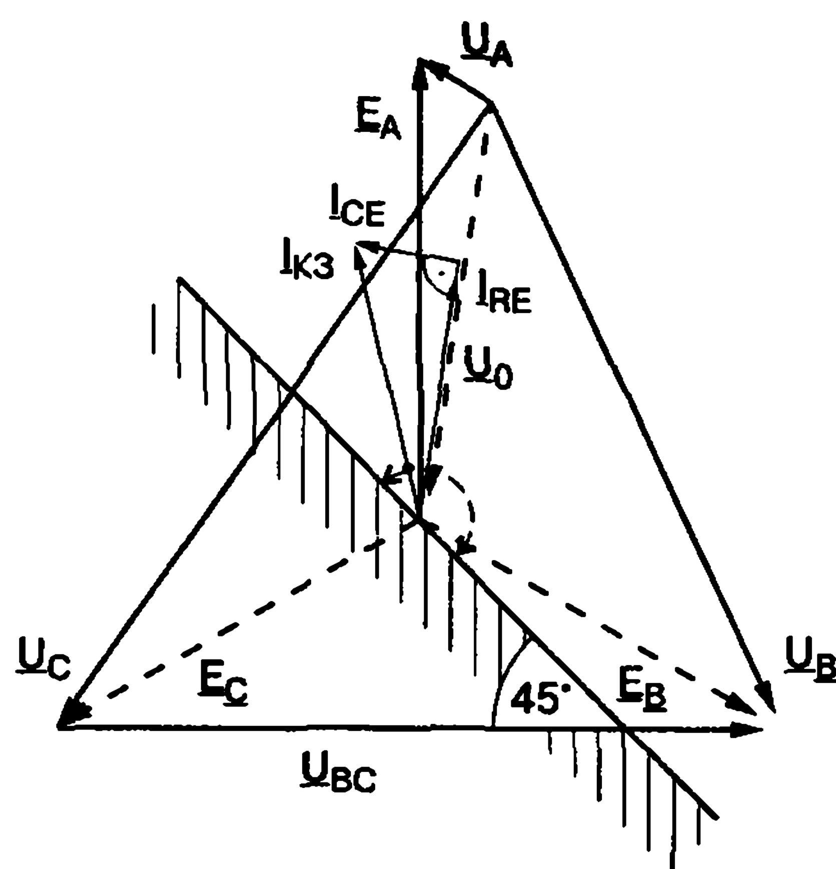
$$I_{CE} = j\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}\,\omega CE$$

* C_E — емкость относительно земли неповрежденной части схемы;
C_1 — емкость системы прямой последовательности

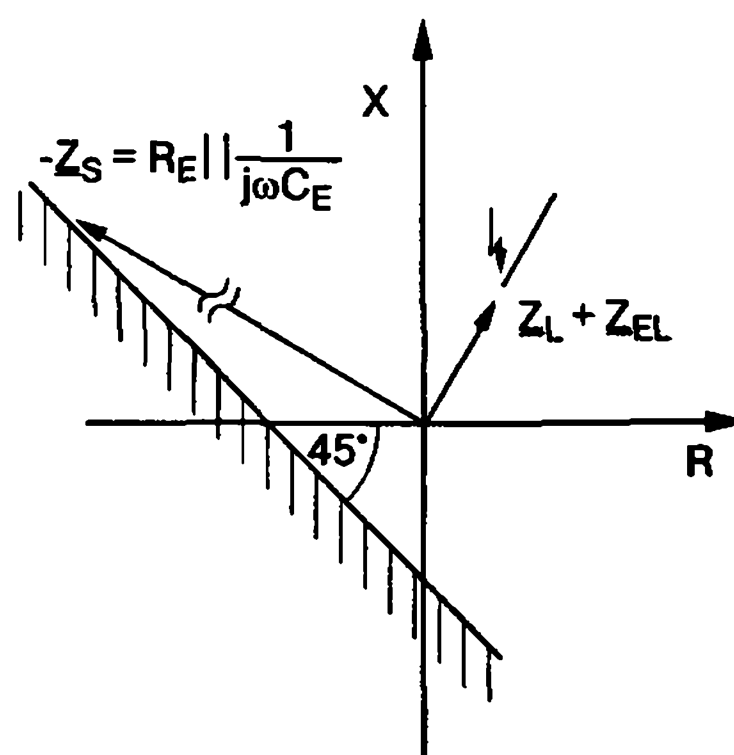
а) Схема сети



б) Комплексная схема замещения



в) Диаграмма токов и напряжений



г) Диаграмма сопротивлений

Рис. 5.33. Сеть с активным сопротивлением заземления, влияние емкости сети относительно земли на определение направления ($R_E \gg Z_T$)

С теоретической точки зрения интересной является следующая ситуация.

Если по какой-то причине в большой кабельной сети заземление нейтральной точки будет отсутствовать при однофазном замыкании на землю, реле определит неверное направление по ёмкостному току в земле (току КЗ) и напряжению неповрежденной фазы. Это не относится к определению направления по напряжению контура КЗ и к собственно дистанционным измерениям, так как измеренное при КЗ сопротивление защищаемого кабеля или воздушной линии не зависит от источника.

Также необходимо заметить, что на заземленных трансформаторах нагрузки необходимо использование пускового органа сопротивления или комбинированного ПО, поскольку часть тока КЗ течёт по здоровым фазам, и пусковой орган максимального тока (МТЗ) не может работать селективно. (Bauch's paradox, см. п.п. 3.1.6, рис. 3.15).

5.2.4. Дистанционная защита в заводских электросетях

Для промышленных сетей характерны высокая плотность оборудования, короткие кабели и большие токи КЗ.

В этих условиях традиционные дистанционные защиты обычно использовались как резервные. Основной являлась продольная дифференциальная защита. С появлением цифровой техники дистанционные защиты всё чаще стали использоваться как основные, так как область действия может быть установлена достаточно маленькой. Явным преимуществом является независимость уставок *R* и *X* друг от друга (многоугольные характеристики срабатывания), поскольку всегда есть возможность предусмотреть большое сопротивление дуги.

Кроме того, в цифровых реле 7SA направление замыкания определяется по напряжениям неповреждённых фаз и по

напряжениям, занесённым в память, что гарантирует абсолютную селективность отключения при близких замыканиях [5.30].

Наименьшая уставка ступени в реле 7SA6 равна 0,05 Ом — вторичное сопротивление ($I_{ном}$= 1 А). Тогда наименьшая длина линии, на которой может использоваться дистанционная защита без каналов связи, менее 200 м, в зависимости от поперечного сечения кабеля и коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов. По сравнению с электромеханическими реле (R1KZ4) это позволяет уменьшить минимальную зону действия в 5 раз (см. также 5.1.2).

Для отключения без выдержки времени замыканий по всей длине линии обычно используется схема с каналом связи, по которому передаётся разрешающий сигнал для срабатывания ступени с полным охватом (РОТТ). В качестве канала связи обычно используется контрольный провод, однако, в последнее время его часто стали заменять оптоволоконным кабелем.

Пример использования дистанционной защиты в качестве резервной представлен на рис. 5.34.

Рассматривается обычная промышленная сеть с двусторонним питанием.

Сеть 110 кВ состоит из двух независимых частей, причем каждая получает питание как из энергосистемы (общего пользования), так и от собственных генераторных блоков.

Вся сеть (кабели, трансформаторы, шины) защищается дифференциальной за-

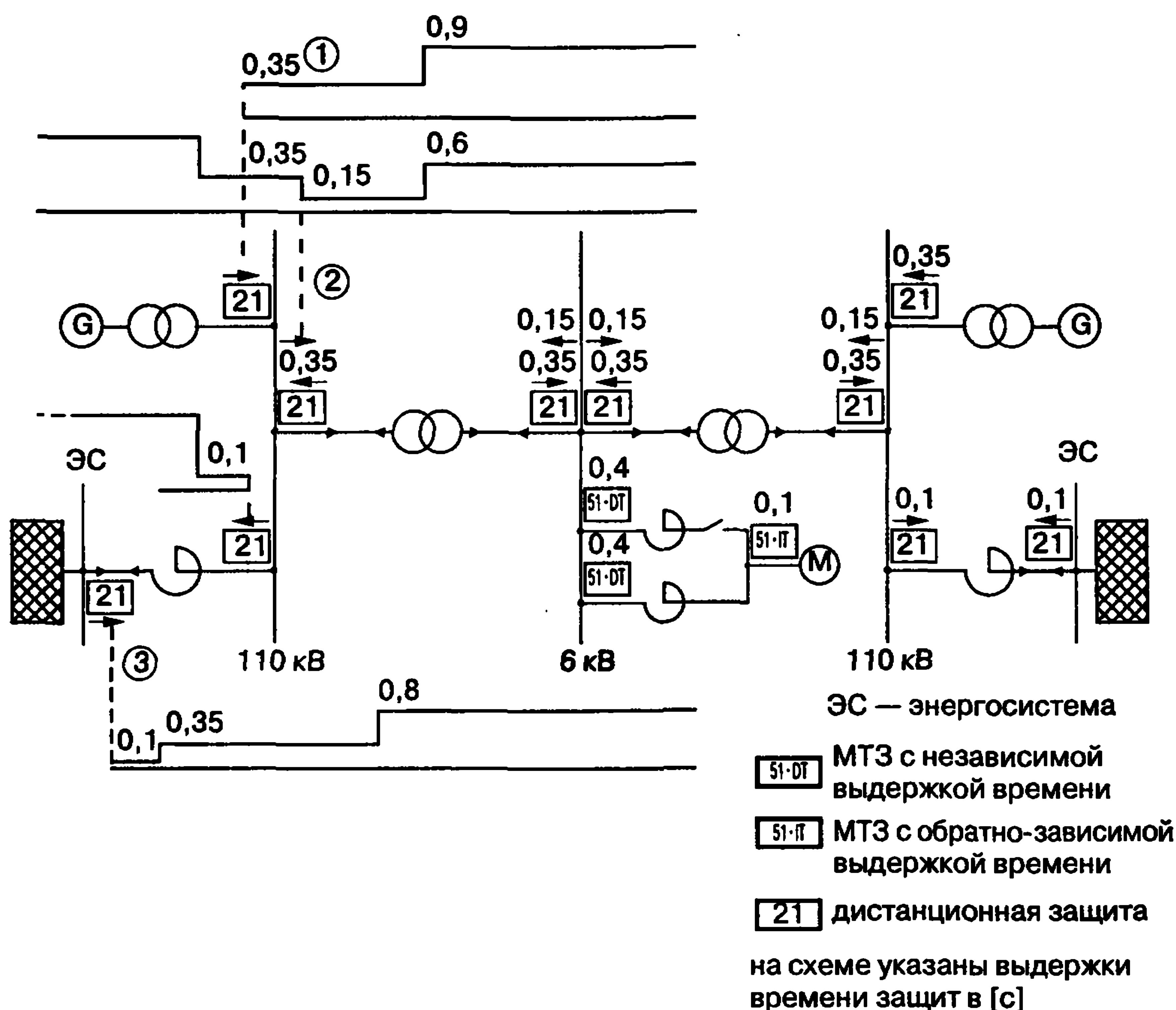


Рис. 5.34. Использование дистанционой защиты в качестве резервной в промышленной сети с параллельными источниками питания

щитой, которая является основной. Дистанционная защита является резервной, и её первая ступень имеет выдержку времени, равную 100—150 мс. Ступенчатые зоны представлены только для дистанционной защиты, расположенной на шинах левого источника питания. Аналогично выполняются и остальные дистанционные защиты.

Уставка первой ступени обычно равна приблизительно 80 % от сопротивления защищаемого участка, определяемого в основном сопротивлением короткого замыкания соответствующего трансформатора. Особым преимуществом для устройства 7SA6 является возможность выбора направления действия всех ступеней. Третья ступень защиты 2, например, действует в обратном направлении с выдержкой времени 0,35 с и, таким образом, является резервной защитой шин; в прямом направлении действуют ступени 1(0,15с) и 2 (0,6с), которые являются резервными защитами для участков кабели-трансформатор и сети 6 кВ.

5.3. Дистанционная защита в магистральных сетях

5.3.1. Общие положения

Магистральные сети обычно являются разветвлёнными с глухо заземлённой нейтралью. Для ограничения тока при КЗ на землю часть трансформаторов работает с изолированной нейтралью.

Рабочие напряжения сетей находятся в диапазоне от 100 до 800 кВ. На низких напряжениях нельзя чётко разграничить магистральную и распределительную сети. Например, в Германии сеть 100кВ рассматривается как распределительная, тогда как в развивающихся странах линии электропередачи напряжением 132 кВ и даже 60 кВ являются магистральными.

В центральной Европе средняя длина линий СВН меньше 50 км, т. к. электростанции и потребители распределены равномерно. Поэтому устойчивость систем очень высока. При близких замыканиях допускается время отключения замыкания до 100 мс, тогда как замыкания, близкие к концу линии, вообще не нарушают устойчивости системы и поэтому могут быть отключены 2-ой ступенью (400мс).

Вне территории Европы длины линий могут достигать 400км, т. к. иногда появляется необходимость передачи электроэнергии на большие расстояния от гидроэлектростанций к центрам потребления. В таких системах возможно нарушение устойчивости и поэтому время отключения КЗ должно быть меньше 3 периодов.

Системы защиты должны быть спроектированы с учетом сказанного.

Наиболее часто в магистральных сетях используются дистанционные защиты.

Они, в основном, выполняются с каналами связи для того, чтобы обеспечить быстрое отключение КЗ по всей длине линии. Кроме того, дистанционная защита обеспечивает дальнее резервирование при отказе защиты или выключателя смежных участков.

В сетях высокого напряжения Германии она часто является единственной защитой, выполняемой как с каналом связи, так и без него. В других странах она часто используется на воздушных линиях как резервная защита в сочетании с направленной токовой защитой. На кабельных линиях дистанционная защита применяется, в основном, без каналов связи в качестве резервной к дифференциальной защите.

В сетях СВН в настоящее время используются избыточные системы защиты. Для

этого дистанционные защиты либо дублируются (причём, используются защиты различных типов, обычно от различных производителей), либо применяются вместе с дифференциальной или дифференциально-фазной защитой.

Если дистанционная защита дублируется, то, по возможности, используются различные виды сигналов в каналах связи. Разрешающие, блокирующие и отключающие сигналы комбинируются для того, чтобы избежать отказов группового типа.

Рассматриваемые ниже положения являются общими для дистанционных защит, используемых в магистральных сетях.

Трёхфазное/однофазное АПВ

В магистральных сетях используются следующие типы АПВ:

трёхфазное АПВ с маленькой выдержкой времени для всех типов замыканий (предпочитается в США);

однофазное АПВ с маленькой выдержкой времени для однофазных замыканий (редко при двухфазных замыканиях без земли); при многофазных КЗ АПВ не используется (характерно для Германии);

однофазное АПВ с маленькой выдержкой времени при однофазных замыканиях;

трёхфазное АПВ с маленькой выдержкой времени при многофазных замыканиях.

В некоторых странах используется дополнительно трёхфазное АПВ с большой выдержкой времени.

Кроме того, существуют некоторые другие редко используемые типы АПВ, например, трехфазное АПВ, применямое только при однофазных замыканиях, в сочетании с блокировкой АПВ при трёхфазных замыканиях.

Трехфазное или пофазное отключение цепей

В сетях с заземленной нейтралью однофазные замыкания должны выявляться защитой и отключаться. В сетях без АПВ или только с трёхфазным АПВ выключатель отключает все три фазы. Это упрощает управление выключателем и выполнение защиты, т. к. в этом случае защита может не обладать фазной селективностью. Каждое однофазное замыкание, однако, приводит к отключению всех трёх фаз линии. Такой принцип работы применяется в США.

При использовании однофазного АПВ выключатель должен иметь пофазный привод, и до АПВ защита должна действовать на отключение только поврежденной фазы. Только при последнем отключении после неуспешного АПВ отключаются все три фазы. Управление выключателем в этом случае должно быть пофазным, а дистанционная защита должна обеспечивать фазную селективность и иметь отдельное реле отключения для каждой фазы.

Такой принцип работы обычно используется в Центральной Европе.

Дистанционная защита при однофазном АПВ

В этом случае дистанционная защита должна обеспечивать селективное определение и отключение однофазного замыкания. Это возможно при использовании цифровых реле 7SA. Обеспечение фазной селективности затруднено на длинных, сильно нагруженных линиях, так как сопротивления нагрузки оказываются соизмеримыми с сопротивлениями при КЗ (см. п.п. 3.1.6). Поэтому в цифровых устройствах 7SA6 и 7SA522 используется специальный алгоритм, который в любом случае определяет повреждённую фазу при помощи сравнения углов (фаз) и распознавания симметричных составляющих, а также с помощью оценки аварийных составляющих токов (полный ток замыкания за вычетом сохраненного значения тока нагрузки).

Комбинированный пуск, характерный для немецкоговорящих стран, практически всегда позволяет обеспечить селективность отключения при однофазных замыканиях, так как напряжение снижается только в повреждённой фазе. Необходимым условием является измерение напряжения фаза—земля и блокировка междуфазной системы измерений при однофазных замыканиях.

Это может быть обеспечено с помощью критерия определения замыкания на землю (I_E > и $3 \cdot U_0$ >), или тем, что используются только 3 системы измерений в контурах фаза—земля. Последний способ применяется в электромеханических пусковых органах (R3Z2 и R3Z3v). В случае цифровых реле рекомендуется использование первого способа, поскольку он обеспечивает дополнительную надёжность определения повреждения при двухфазных замыканиях.

Защита при включении на КЗ

На воздушных линиях в магистральных сетях предусматривается наружная установка ТН, подсоединенных к линии за выключателем, к ним подключается дистанционная защита. При включении линии всегда существует вероятность включения на короткое замыкание (не снятое рабочее заземление). В этом случае напряжение для определения направления короткого замыкания отсутствует, и направленные дистанционные ступени не могут обеспечить абсолютно надёжное отключение.

В цифровых реле при включении линии вводится дополнительная логика. Этой логикой в течение определённого промежутка времени после подачи команды на включение с пульта управления разрешается отключение ненаправленной ступенью с полным охватом или ступенью пускового органа без замедления. В любом случае характеристика этой ступени на диаграмме сопротивлений должна охватывать точку начала координат с достаточным запасом (смещённая ступень).

Зона досягаемости этой ступени не должна быть слишком большой для того, чтобы избежать срабатывания при протекании пускового тока по линии или кабелю. На линиях длиной более 100 км или на кабелях с большой ёмкостной нагрузкой использование ненаправленной ступени с зоной действия, превышающей на 20—30 % длину линии, предпочтительнее по сравнению с обычно используемой пусковой ступенью с большой зоной (чувствительная ступень). Эта проблема обычно возникала при использовании быстродействующих аналогово-статических реле. Цифровые реле имеют более эффективные фильтры составляющих основной частоты и поэтому являются менее чувствительными.

Параллельные линии

В промышленных странах большинство магистральных линий являются двухцепными. Часто на одной опоре может быть подвешено больее двух трёхфазных линий, которые, к тому же, могут принадлежать к различным классам напряжений.

При выборе уставок дистанционных ступеней необходимо учитывать сопротивление взаимной индукции между линиями и возможность применения компенсации влияния параллельной линии. Такая компенсация крайне важна для точного определения места замыкания (см. п.п. 3.5.3).

Замыкания с большим активным сопротивлением

Магистральные линии обычно подвешиваются на стальных опорах и имеют один или более заземляющих проводов. Поэтому активное сопротивление замыка-

ния на землю при перекрытии изоляторов составляет несколько Ом. В редком случае при замыкании через дугу в середине пролёта (например, в результате пожара кустарника под ЛЭП) или при перекрытии по деревьям возможно появление большого сопротивления в точке замыкания. В зависимости от значения уставки ступени в R направлении возможно определение замыканий с сопротивлением в точке повреждения до нескольких десятков Ом. Большие значения переходных сопротивлений находятся вне зоны действия дистанционной защиты и должны определяться отдельной защитой от замыканий на землю. По этой причине дистанционные реле 7SA содержат чувствительную направленную защиту от замыканий на землю (минимальная уставка $I_E \geqslant 0{,}1\ I_{ном}$). Она может быть использована как резервная защита с выдержкой времени или вместе с устройством для передачи сообщений как быстродействующая направленная защита от замыканий на землю со сравнением. Таким образом могут быть определены замыкания с активным сопротивлением до нескольких сотен Ом.

Защита с передачей информации

Важные магистральные линии практически всегда снабжены каналами связи. Критерии выбора принципа работы дистанционной защиты с каналом связи рассмотрены в п.п. 5.1.4.

В прошлом использовались только PLC (по ЛЭП) каналы с узкой частотной полосой и микроволновые радиоканалы, а также, в некоторых случаях, воздушные коаксиальные кабели. Поэтому, как правило, дистанционная защита дублировалась или использовалась вместе с защитой, основанной на сравнении фаз.

С появлением современных цифровых каналов связи, таких как оптоволоконные кабели и микроволновые радиоканалы, стала возможной быстродействующая передача кодированных сигналов. Благодаря этому появилась возможность использования дифференциальной защиты на более длинных линиях. Однако проблема, связанная с коммутацией канала связи, которая приводит к изменению времени передачи сигнала, осталась. Дифференциальные реле не позволяют решить эту проблему. В результате проектировщики до сих пор предпочитают использовать продублированную дистанционную защиту, если нет выделенного канала связи с фиксированным временем передачи сигнала.

Качания мощности в системе

В слабосвязанных разветвлённых сетях с длинными магистральными линиями велика вероятность возникновения качаний мощности. Качания могут быть вызваны короткими замыканиями и коммутациями в системе, резким изменением сопротивления линии передачи.

Диапазон частоты качаний в системе широк (от долей Гц до нескольких Гц) и зависит от условий работы системы. Из-за развивающихся качаний система становится неустойчивой и теряет синхронизм.

В устройстве 7SA может быть использована как блокировка при качаниях так и функция отключения качаний (см. п.п. 3.1.11).

В сильно разветвлённых сетях с высокой пропускной способностью, работающих с маленьким углом передачи, качания мощности большой амплитуды не возникают, так что нет необходимости использовать блокировку при качаниях (в Германии в настоящее время она не используется вообще).

Длинные линии

В странах с большой территорией должны быть рассмотрены длинные магистральные линии.

Ниже перечисленные свойства этих линий затрудняют использование на них дистанционных защит.

- Малые уровни токов коротких замыканий, которые могут оказаться значительно ниже номинального тока, соизмеримые с токами заряда и несимметрии.
- Сопротивления нагрузки близки по значениям к сопротивлениям КЗ.
- Поворот направленных характеристик, обусловленный большим углом передачи (см. п.п. 3.3.5).
- Возникновение переходных колебаний, вызванное большими заряженными ёмкостями и их резонансом с компенсирующими реакторами.
- Различные явления (например, инверсия напряжения), связанные с последовательной компенсацией (см. п.п. 3.5.6).

Использование цифровой измерительной техники позволяет получить хорошие результаты при решении перечисленных проблем.

- Селективное определение замыкания достигается при использовании оптимизированных пусковых характеристик и регулируемых уставок вместе с новыми совершенными алгоритмами (сравнение сопротивлений, распознавание образов, оперативное вычисление и оценка симметричных составляющих).
- Высшие гармоники практически полностью подавляются при помощи цифровых фильтров.
- Явление инверсии напряжения на линиях с продольной емкостной компенсацией устраняется при помощи частотно-компенсированной «памяти напряжений».

Емкостные трансформаторы напряжения

Емкостные трансформаторы напряжения применяются из-за их высокой стоимости, в основном, в сетях СВН. В то же самое время они облегчают организацию ВЧ-канала связи по линии электропередачи.

Дистанционная защита должна обладать способностью бороться с переходными процессами, возникающими в емкостных трансформаторах (см. п.п. 5.1.5.2).

Трансформаторы тока с воздушными промежутками в сердечнике

При больших токах КЗ и полном цикле АПВ С-О-С-О (повторное включение на КЗ) обычно используются ненасыщающиеся трансформаторы тока, сердечники которых имеют воздушные промежутки (класс TPY) или трансформаторы тока с линеаризованными сердечниками (класс TPZ). При использовании ТТ класса TPZ возрастает апериодическая составляющая тока размагничивания после отключения тока КЗ. Для уменьшения времени возврата пусковых органов тока в них должны быть установлены специальные фильтры (см. п.п. 5.1.5.1.).

5.3.2. Концепция защиты

Ниже рассмотрены стандартные принципы построения защиты в магистральных сетях.

5.3.2.1. Высоковольтные воздушные линии электропередачи

В промышленных странах этот класс напряжения относится как к магистральным, так и к распределительным сетям. В Германии сети напряжением 110 кВ обычно относятся ко второй категории. Однако в развивающихся странах сети высокого напряжения часто относят к магистральным.

При проектировании защиты следующие критерии являются определяющими:

— требуемое (допустимое) время отключения (требуется ли быстрое отключение всей линии или допускается отключение части линии второй ступенью с выдержкой времени 300—500 мс?);

— режим работы нейтрали (тип защиты от замыканий на землю);

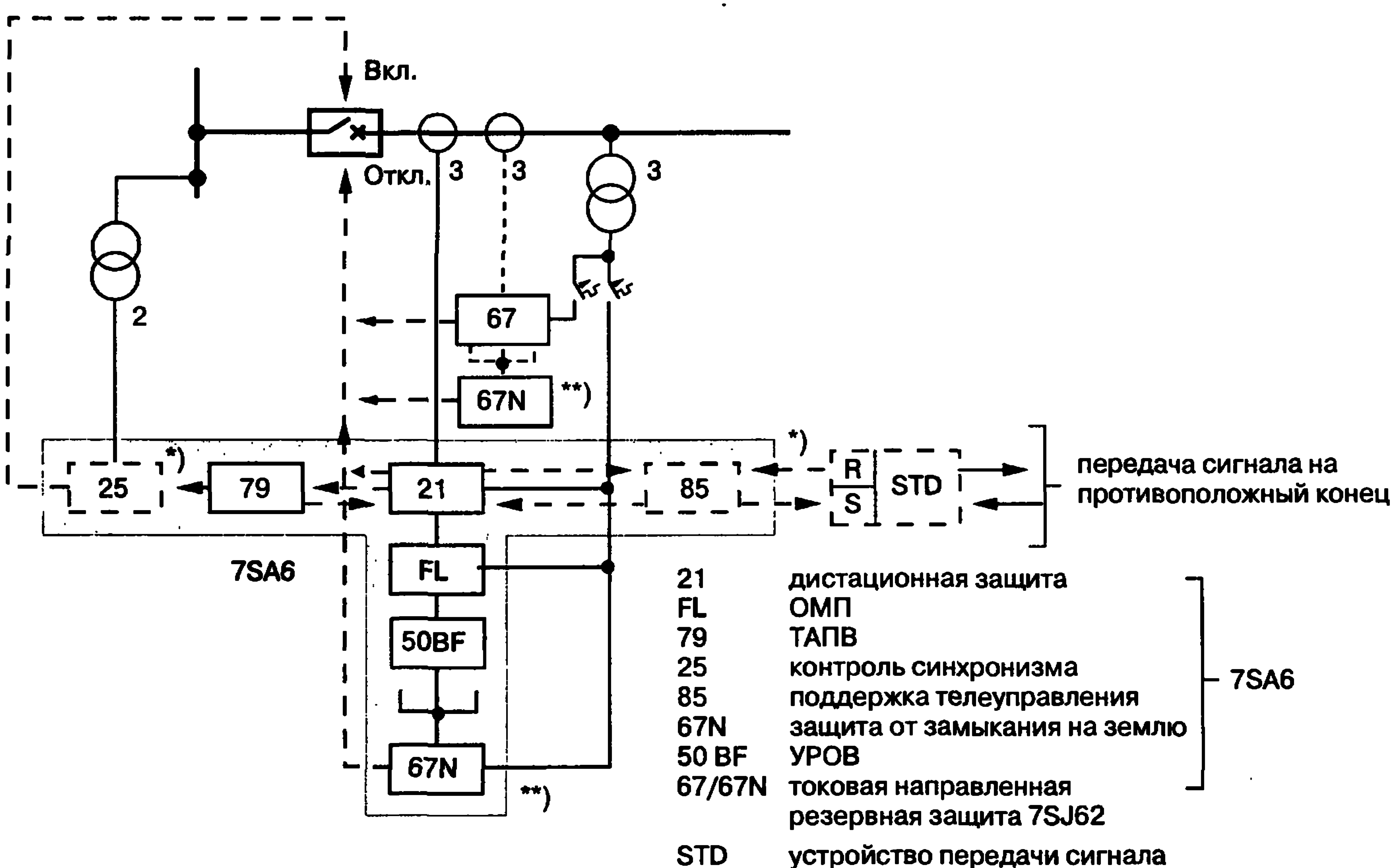
— избыточность защиты (требуется ли второе устройство защиты, или достаточно дальнего резервирования).

Эффективно заземлённые системы

Обычно в сетях этого напряжения дистанционная защита является основной, а в качестве резервной используется направленная токовая защита (рис. 5.35).

Для линий, имеющих особое значение, либо с проблемами устойчивости, может потребоваться мгновенное отключение замыканий по всей длине линии. В этом случае должны использоваться схемы защиты с передачей сигнала.

Замыкания на землю обычно обнаруживаются дистанционной защитой. Для защиты от замыканий с большим сопротивлением требуется дополнительная токовая чувствительная защита. Традиционно для этого использовалась отдельная защита нулевой последовательности с



*) только для ответственных линий (использование управляемой АПВ ступени с расширением вместо телеуправления)

**) — направленная защита НП (IDMTL) в сетях с эффективным заземлением нейтрали,
— отдельное реле 7SN61 для защиты от замыканий на землю в компенсированных сетях (только на сигнал)

Рис. 5.35. Концепция защиты для линий ВН

обратно-зависимой выдержкой времени. В устройстве цифровой дистанционной защиты (7SA6) возможно использование направленной и ненаправленной защиты обратной последовательности с различными вариантами выдержки времени: независимая и обратно-зависимая выдержка времени (IDMTL). Чувствительность защиты обеспечена при токах НП в диапазоне от 5 до 20% $I_{ном}$.

В особых случаях, когда замыкания на землю с большим сопротивлением петли и, соответственно, с малыми токами нулевой последовательности должны также отключаться без выдержки времени, может быть использован направленный элемент, реагирующий на ток нулевой последовательности. В совокупности с каналом связи он обеспечивает реализацию направленной токовой защиты нулевой последовательности с абсолютной селективностью (ТНЗНП со сравнением направлений).

Если применяется дистанционная защита с каналом связи для передачи блокирующего или разрешающего сигнала (POTT), то тот же самый канал может быть использован и для выполнения направленной токовой защиты нулевой последовательности с абсолютной селективностью с передачей блокирующего или разрешающего сигнала.

В сетях такого напряжения обычно используется ТАПВ.

При однофазных замыканиях на землю также может быть выбрано ОАПВ. Необходимым условием при этом является пофазный привод выключателя на защищаемой линии.

При многофазных замыканиях всегда используется трёхфазное отключение и ТАПВ, после которого иногда следует цикл АПВ с более длительной выдержкой времени. При использовании 7SA6 возможно применение ускоренного АПВ при двухфазных замыканиях без земли. Однако оно применяется редко, поскольку выключатель обычно не рассчитывается на такое воздействие. Принципы выполнения АПВ в разных странах и на разных предприятиях часто отличаются из-за индивидуальных особенностей систем и разного опыта эксплуатации (см. 3.1.12). Современные цифровые устройства позволяют использовать все возможные принципы работы АПВ (многократное, ускоренное, с длительной выдержкой времени, ОАПВ и ТАПВ) и могут быть адаптированы к существующим условиям эксплуатации соответствующим выбором уставок.

Если защищаемой является воздушно-кабельная линия, причем кабельный участок линии находится в конце, то АПВ должно выполняться только в случае замыканий на воздушной линии. Это может быть реализовано использованием специальной ступени и дополнительной логики. При близости защищаемой линии к электростанциям необходима функция контроля синхронизма для предотвращения асинхронного включения выключателя и повреждения генераторов.

При защите кабельных линий может быть включена защита от тепловой перегрузки.

На современных объектах используется защита от отказа выключателя, включенная в состав функций цифрового терминала защиты. С другой стороны, всё ещё широко используется дальнее резервирование с помощью ступеней дистанционных защит и ТЗНП со ступенчатыми выдержками времени.

Цифровая дистанционная защита 7SA6 включает все указанные функции защиты. Для линий длиной до 35 км защита с телеуправлением может быть выполнена с помощью прямого оптоволоконного канала связи. В остальных случаях необходимо

использование внешних коммуникационных модемов или устройств (см. п.п. 4.3), которые соответствуют выбранному каналу связи.

Для реализации независимой направленной и ненаправленной токовой резервной защиты может быть использовано реле 7SJ61. С его помощью также может быть выполнена резервная защита от замыканий на землю параллельно с дистанционной защитой 7SA6.

Сети с компенсированной нейтралью (заземлённой через катушку Петерсона)

Здесь могут быть использованы те же защиты, что и в сетях с эффективно заземлённой нейтралью, за исключением защиты от замыканий на землю (рис. 5.34).

Однофазные замыкания на землю здесь не должны отключаться защитой от коротких замыканий, т. к. они либо самоустраняются, либо отключаются после соответствующей реконфигурации системы. Определение места повреждения выполняется специальными направленными защитами от замыканий на землю.

В случае двойных замыканий на землю только одна фаза должна быть отключена.

Дистанционные реле немецких фирм-производителей могут работать в таком режиме после соответствующего выбора уставок (см.п.п.5.2.2).

Каналы связи в этом случае обычно не требуются. Для быстрого отключения замыканий используется расширение зоны действия ступеней, контролируемое АПВ (см.п.п.3.1.12). Ускоренное АПВ всегда является трёхфазным, выдержка времени имеет уставку от 0.3 до 0.5 с.

Обычно используются простые защиты без дополнительного резервирования. Такой принцип защиты характерен для сетей 110кВ в Германии. После отказа защиты или выключателя предыдущая защита должна отключить замыкание одной из высших ступеней.

Направленные защиты от КЗ на землю, обычно используемые в распределительных сетях, могут применяться только в радиальных и кольцевых сетях и требуют установки дополнительных ТТ.

В разветвлённых сетях ВН используются специальные реле для защиты от замыканий на землю, которые реагируют на переходные колебания, возникающие при повреждений (7SN6).

5.3.2.2. Линии сверхвысокого напряжения

По линиям СВН осуществляется передача мощности на большие расстояния. Линии этого класса напряжения оснащаются избыточными системами защиты. Обычно используются две различные системы основной защиты: либо две непереключаемые дистанционные защиты, либо дистанционная защита и защита со сравнением фаз или дифференциальная защита. Если используются две дистанционные защиты, то для того, чтобы уменьшить вероятность группового отказа, они либо относятся к разным типам, либо выпущены различными производителями. Применение дистанционной защиты не ограничено длиной линии. Защита со сравнением фаз может быть использована только на линиях длиной до 200км в сочетании с узкополосным PLC — каналом (2,5 или 4 кГц). В настоящее время дифференциальная защита с передачей цифрового сигнала всё чаще используется в качестве второй защиты вместе с дистанционной. Передача сигнала осуществляется по выделенным оптоволоконным линиям либо по каналам цифровых сетей связи, если это возможно.

Критерии выбора принципа работы дистанционной защиты с каналом связи были рассмотрены в п.п. 5.1.4.

В Германии практически всегда используется схема с передачей разрешающего сигнала отключения для ступени с неполным охватом и расширением зоны (PUTT).

За пределами Европы используются различные схемы защиты: например, с передачей разрешающего, либо блокирующего сигнала для ступени с неполным охватом (см. 5.1.4).

Защита линии СВН, представленная на рис. 5.36, имеет следующие особенности:

— избыточность защиты (две системы основной защиты);

— отдельный канал связи для каждой системы защиты; использование, если возможно, различных каналов связи, например, оптоволоконного канала и PLC, либо микроволнового радиоканала;

— независимые источники питания и цепи отключения для каждой системы защиты;

— блокировка при качаниях[22] (целевое отключение качаний мощности на выделенных участках сети);

— защита от перенапряжений на линиях, длиной более 100—200 км;

— для защиты линий с компенсирующими реакторами необходимы дополнительные каналы для прямого отключения выключателя на удалённом конце и блокировки АПВ;

— рекомендуется использование функции контроля синхронизма, если ЭДС источников на двух концах линии могут разой-

[22] В Германии функция блокировки при качаниях не используется из-за высокой устойчивости систем. Однако, немецкие пользователи хотели бы иметь возможность достаточно простого восстановления данной функции. В цифровых реле 7SA эта функция всегда доступна и может быть активизирована изменением параметров уставки.

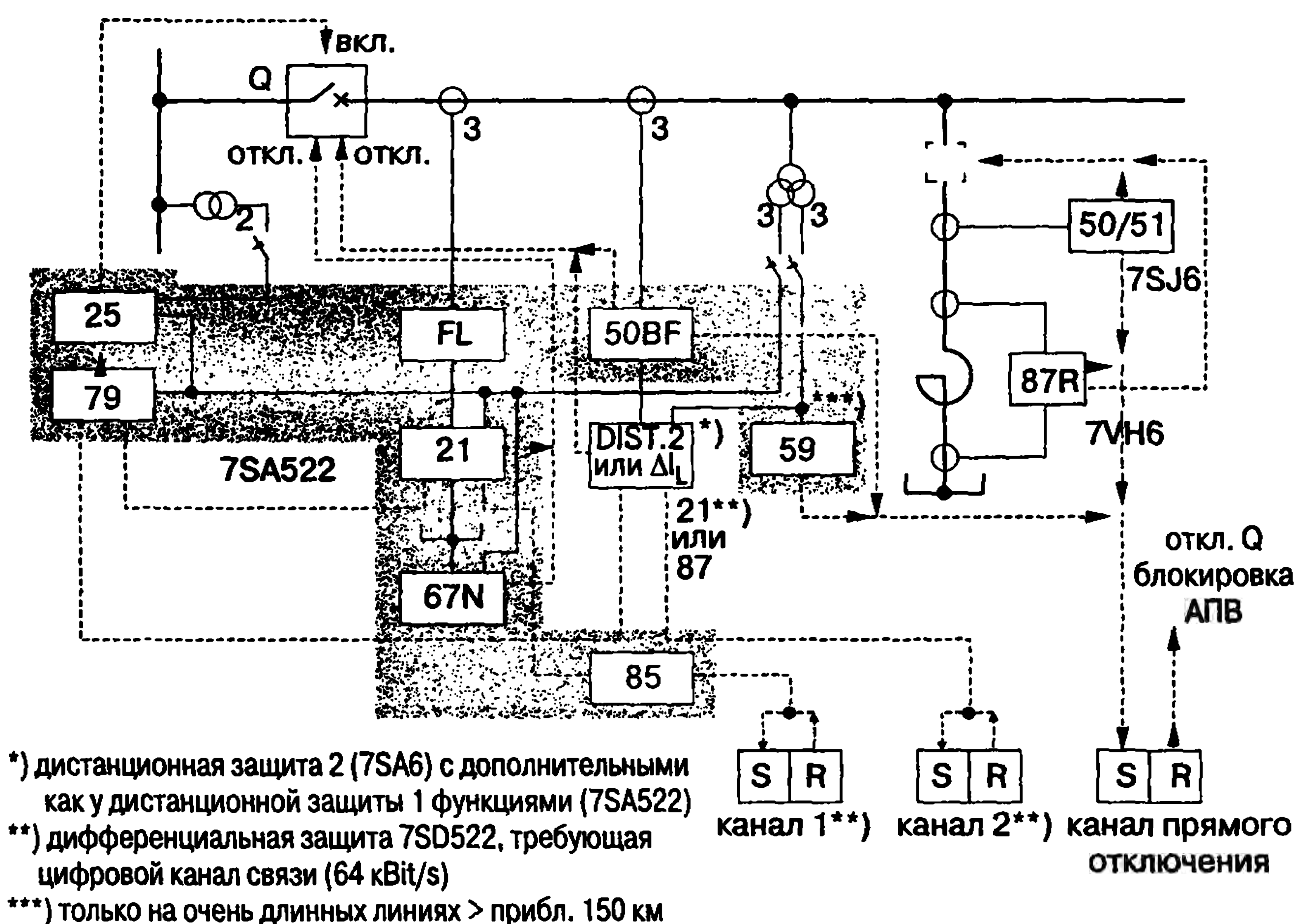


Рис. 5.36. Концепция защиты линии СВН

тись за время паузы АПВ (При однофазном АПВ эта функция не требуется. Если используются оба типа АПВ, то функция контроля синхронизма автоматически блокируется в 7SA6 и 7SA522 в цикле ОАПВ);

— в регионах, где вероятны замыкания с большим активным сопротивлением (горные местности, перекрытия на землю в центре пролёта из-за быстрого роста деревьев или пожара кустарников), необходимо использование дополнительной направленной защиты от замыканий на землю с током срабатывания равен 10—20 % от номинального тока ТТ.

Эта функция должна быть заблокирована автоматически на время паузы при ОАПВ для того, чтобы предотвратить срабатывание из-за протекания тока нагрузки в земле. В устройствах 7SA6 и 7SA522 блокировка производится автоматически.

— Часто вместо или в добавление к защите от замыканий на землю со сравнением направлений используется резервная защита от замыканий на землю с такой же чувствительностью и независимой или зависимой от тока выдержкой времени.

В Германии обычно используется направленная защита от замыканий на землю с зависимой от U_0 выдержкой времени. Эта защита определяет замыкания с большим активным сопротивлением, например, при перекрытии по деревьям, и обычно обеспечивает резервную защиту при замыканиях на землю, если дистанционная защита не может сработать из-за влияния промежуточной подпитки [5.31].

Обратно пропорциональная U_0 выдержка времени позволяет обеспечить селективность отключения, так как напряжение U_0 максимально в точке замыкания (небольшое время отключения) и уменьшается с увеличением расстояния до места замыкания (увеличение времени отключения).

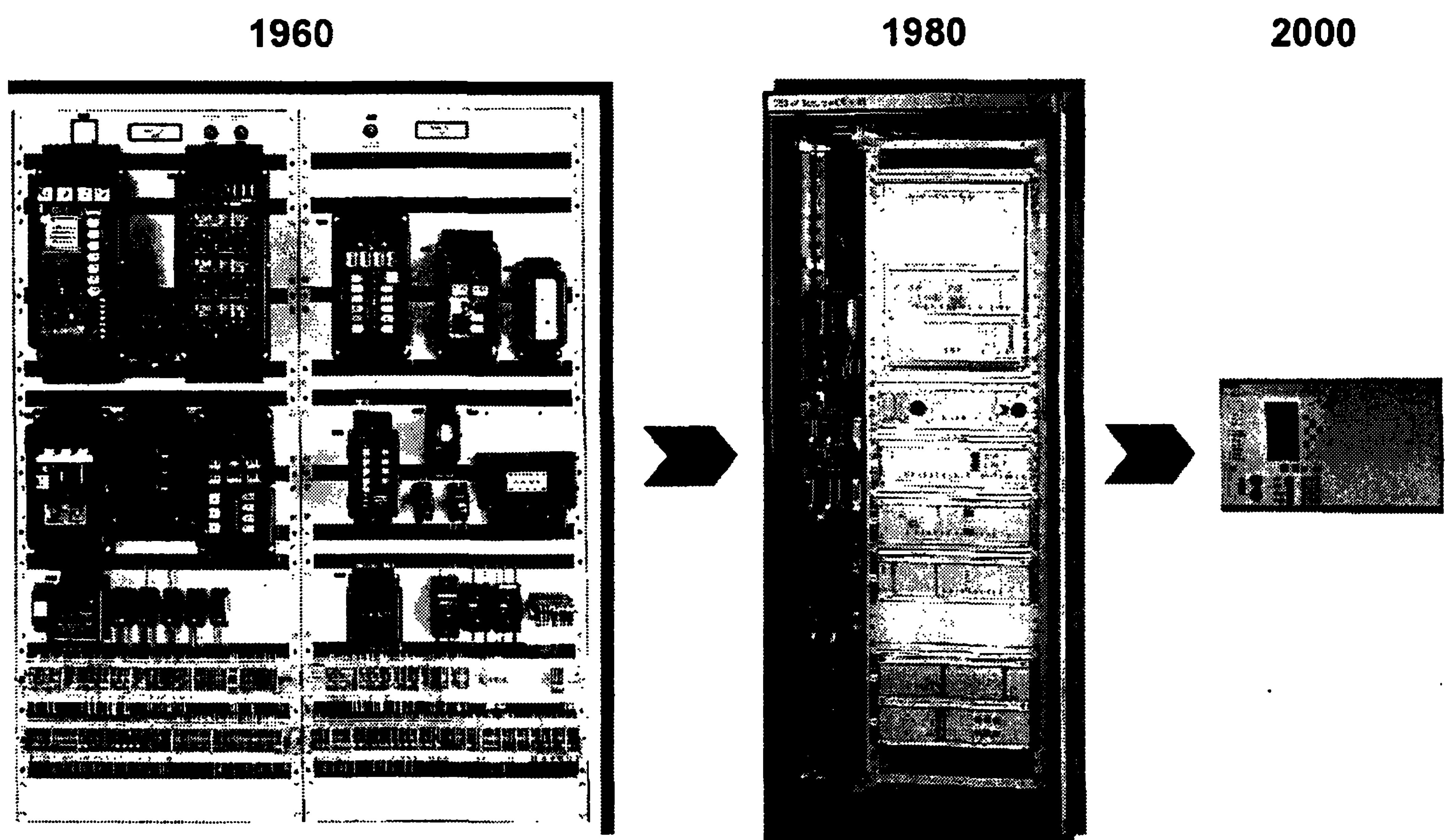


Рис. 5.37. Выполнение защиты линий СВН на разной элементной базе (электромеханическая, статическая и цифровая дистанционная защита)

Все функции защиты, необходимые на каждом конце линии, объединены в одном многофункциональном устройстве (например, 7SA6). Вторая защита выполняется при помощи подходящего дополнительного устройства (7SA522 или 7SD522). При использовании традиционных реле для выполнения тех же функций были необходимы две панели или два шкафа (рис. 5.37).

5.3.2.3. Подстанции с полуторной схемой включения

Схема подключения защиты на подстанциях этого типа представлена на рис. 5.38.

Подключение имеет следующие особенности.

Ток для защиты линии получаем суммированием (параллельное соединение) токов от двух трансформаторов (ветвь между двумя шинами).

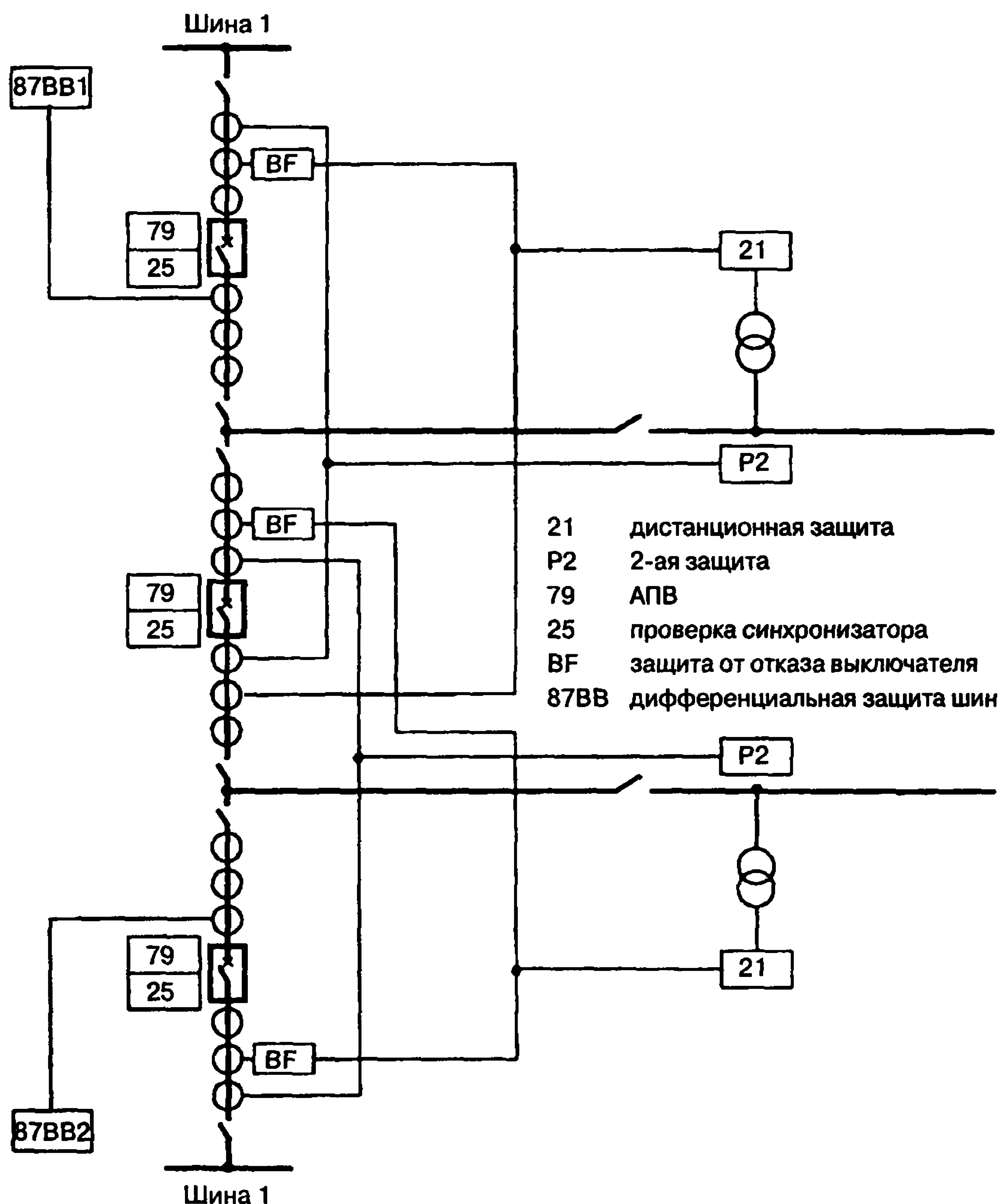


Рис. 5.38. Принцип выполнения защиты линий при полуторной схеме включения

Защита линии должна отключать 2 выключателя. Оба выключателя должны быть отключены одновременно, а АПВ произведено последовательно. Второй выключатель будет включен только в том случае, если первый останется включенным в течение определённого времени (замыкание неустойчивое). Обычно имеется ключ, позволяющий выбрать последовательность включения выключателей.

Функции АПВ и проверки синхронизма выполняют отдельные устройства, расположенные у каждого выключателя. В этом случае подходят цифровые защиты 7SK512.

Каждый выключатель должен быть оснащён отдельной защитой от отказа выключателя. Для этой цели лучше всего подходит устройство 7SV512. Это устройство спроектировано для двухканального управления (пуска) и имеет двухступенчатую программу работы для предотвращения излишнего отключения. Оно контролирует ток, а его алгоритм основан на независимой работе фаз и поэтому может работать вместе с однофазным АПВ.

Полуторная схема включения имеет ряд особенностей, которые здесь подробно не рассматриваются. Однако необходимо заметить, что напряжение для вы-

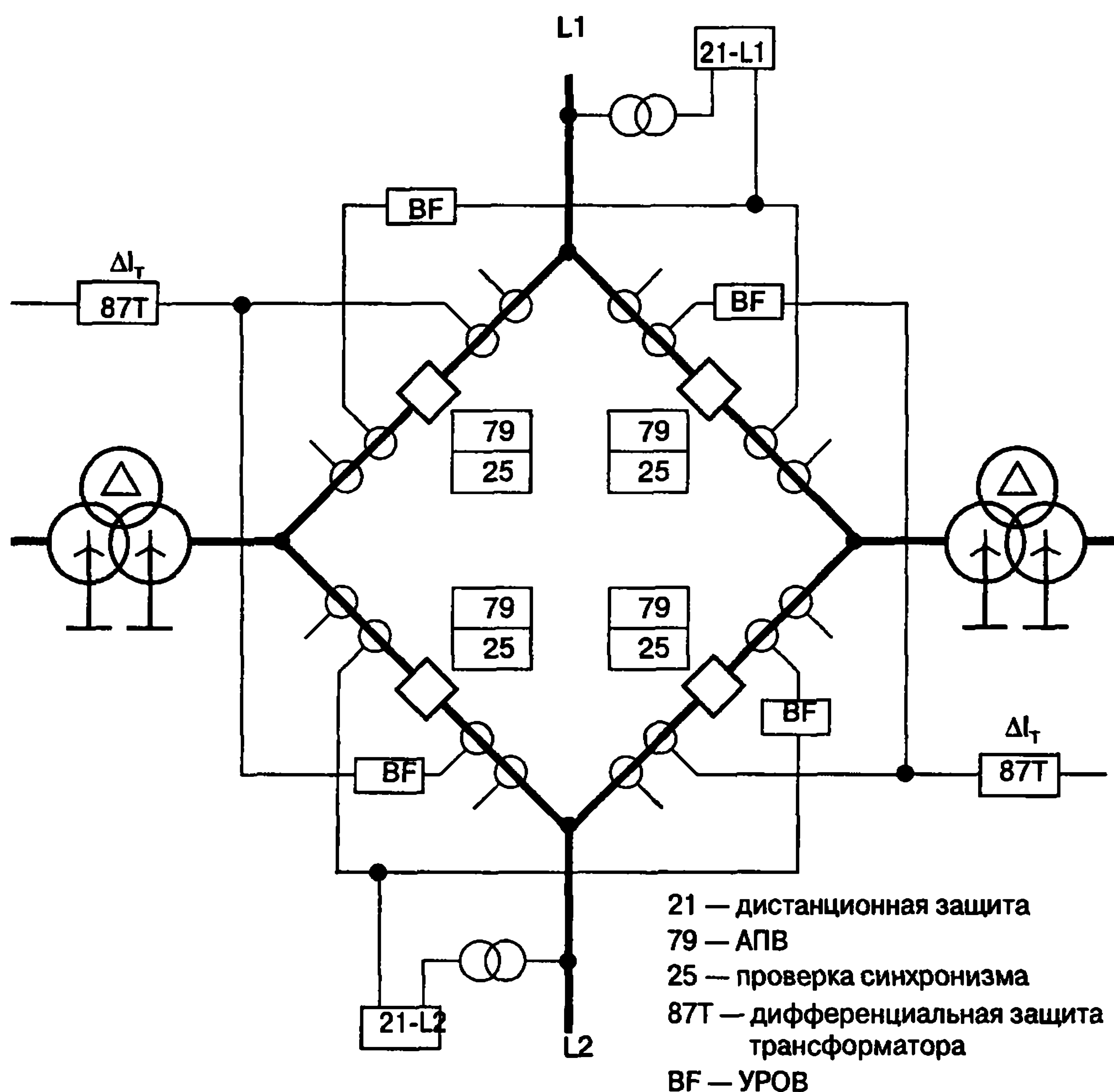


Рис. 5.39. Принцип выполнения защиты кольцевой системы шин (схема четырехугольника); показана одна система защиты

полнения функции контроля синхронизма должно выбираться в зависимости от положения выключателей и разъединителей.

Для выбора системы защиты линии необходима информация о защите соответствующих линий высокого и сверхвысокого напряжения.

5.3.2.4. Кольцевая система шин

Для кольцевой системы шин характерны те же особенности, что и для полуторной схемы РУ. Схема подключения защиты изображена на рис. 5.39.

5.3.2.5. Двухцепные линии

В сущности, защита двухцепной линии аналогична защите одноцепной линии. Различие обусловлено лишь особенностями учета составляющих нулевой последовательности. Необходимо учитывать возможность возникновения двух замыканий на землю на обеих линиях одновременно. Влияние параллельной линии на дистанционную защиту было рассмотрено в п.п. 3.5.3. Функция компенсации влияния параллельной линии для дистанционной защиты и/или устройства ОМП может быть установлена в реле 7SA6, 7SA522 по выбору. Подключение 7SA6 представлено на рис. 5.40.

Пример расчёта и выбора уставок защиты для двухцепной линии рассмотрен в п.п. 7.1.

5.3.2.6. Трехконцевые линии

При защите таких линий основной проблемой является промежуточный источник питания, расположенный на третьем конце. Это было рассмотрено в п.п. 3.5.2. Пример расчёта уставок приведен в п.п. 7.2.

При наличии подпитки с третьей стороны зоны действия резервных ступеней

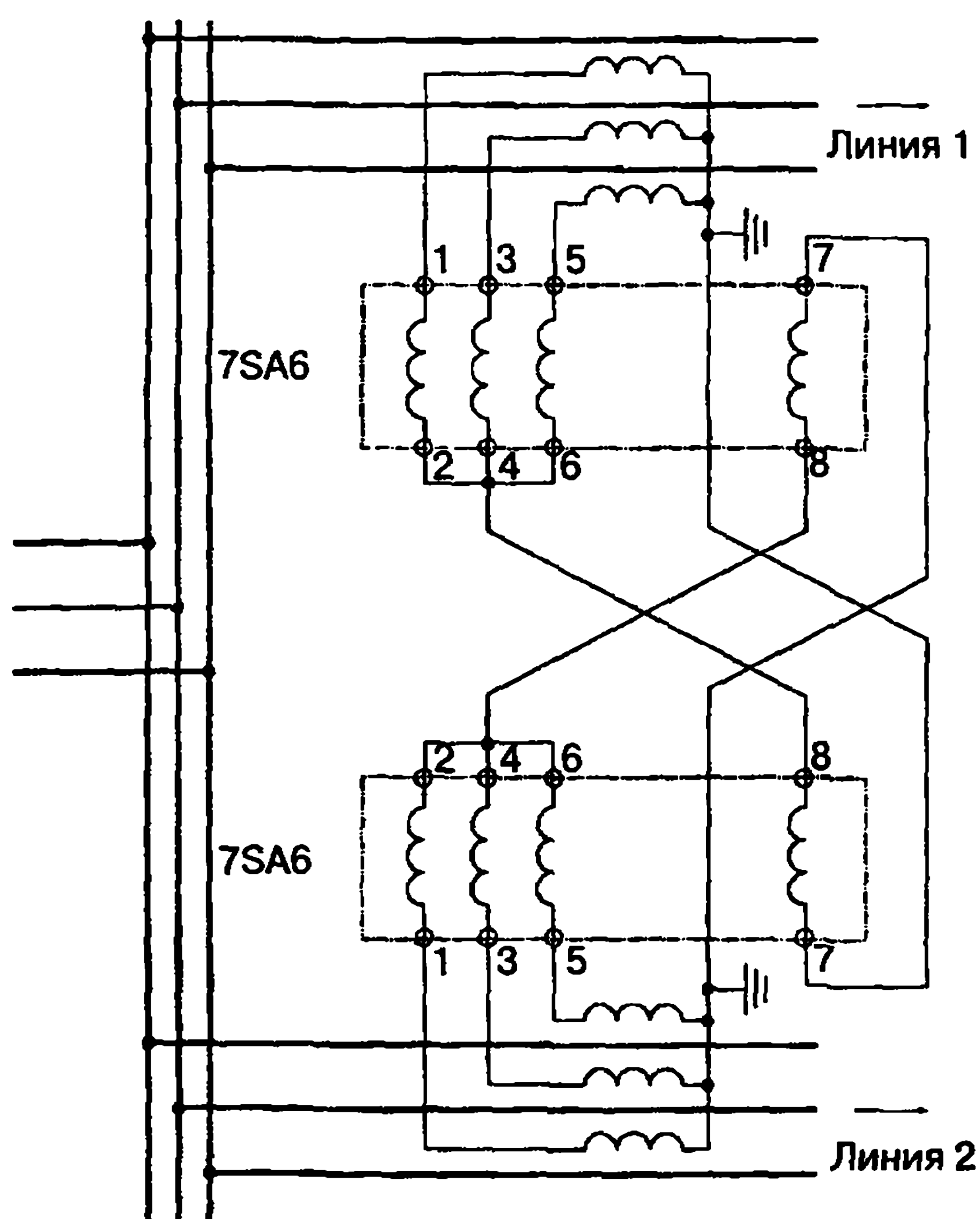


Рис. 5.40. Компенсация влияния параллельной линии, подключение реле 7SA6

дистанционной защиты, при селективном их выполнении, получаются короткими, а выдержки времени длительными.

Если все короткие замыкания на трёхконцевой линии должны отключаться без выдержки времени, то необходимо использование систем защиты с каналами связи. При этом каналы связи должны быть предусмотрены между всеми концами линии. Простая схема с передачей сигнала для ступени с неполным охватом может быть использована только в том случае, если расстояние от концов всех линий до узловой точки практически одинаково. Только в этом случае зона действия ступени с неполным охватом может быть больше, чем расстояние между концом линии и узловой точкой. Таким образом гарантируется то, что все внутренние замыкания будут определены, по крайней

мере, одной из ступеней с неполным охватом. Обычно используется схема с передачей разрешающего сигнала для ступени с полным охватом. Область действия ступеней должна быть больше, чем расстояние до наиболее удалённого конца даже в наиболее тяжёлом случае учета промежуточного источника питания. Отключение разрешается только в том случае, если с обоих противоположных концов получены разрешающие сигналы (последовательное соединение контактов устройств, принимающих сигнал). На концах линий со слабыми источниками питания или при отключенном выключателе, полученный сигнал отражается и передаётся на питающий конец. На рис. 5.41 представлена функциональная схема защиты трехконцевой линии. Подробно случай подключения маломощного источника представлен на рис. 3.37, п.п. 3.1.10.

В цифровых реле 7SA ступени дистанционной защиты с неполным охватом работают параллельно с защитой сравнения сигналов. Это может быть целесообразно в условиях «подпитки от нагрузки» (см. п.п. 3.5.2). В этом случае защита со сравнением сигналов должна быть заблокирована. Если КЗ отключается ступенью с неполным охватом на том конце линии, который ближе всего к замыканию, то «подпитка от нагрузки» прекращается, при этом оставшаяся двухконцевая линия может быть изолирована обычным способом либо через эхо-функцию.

Относительно сложным случаем являются кольцевые трехконцевые линии, где могут потребоваться дополнительные каналы связи.

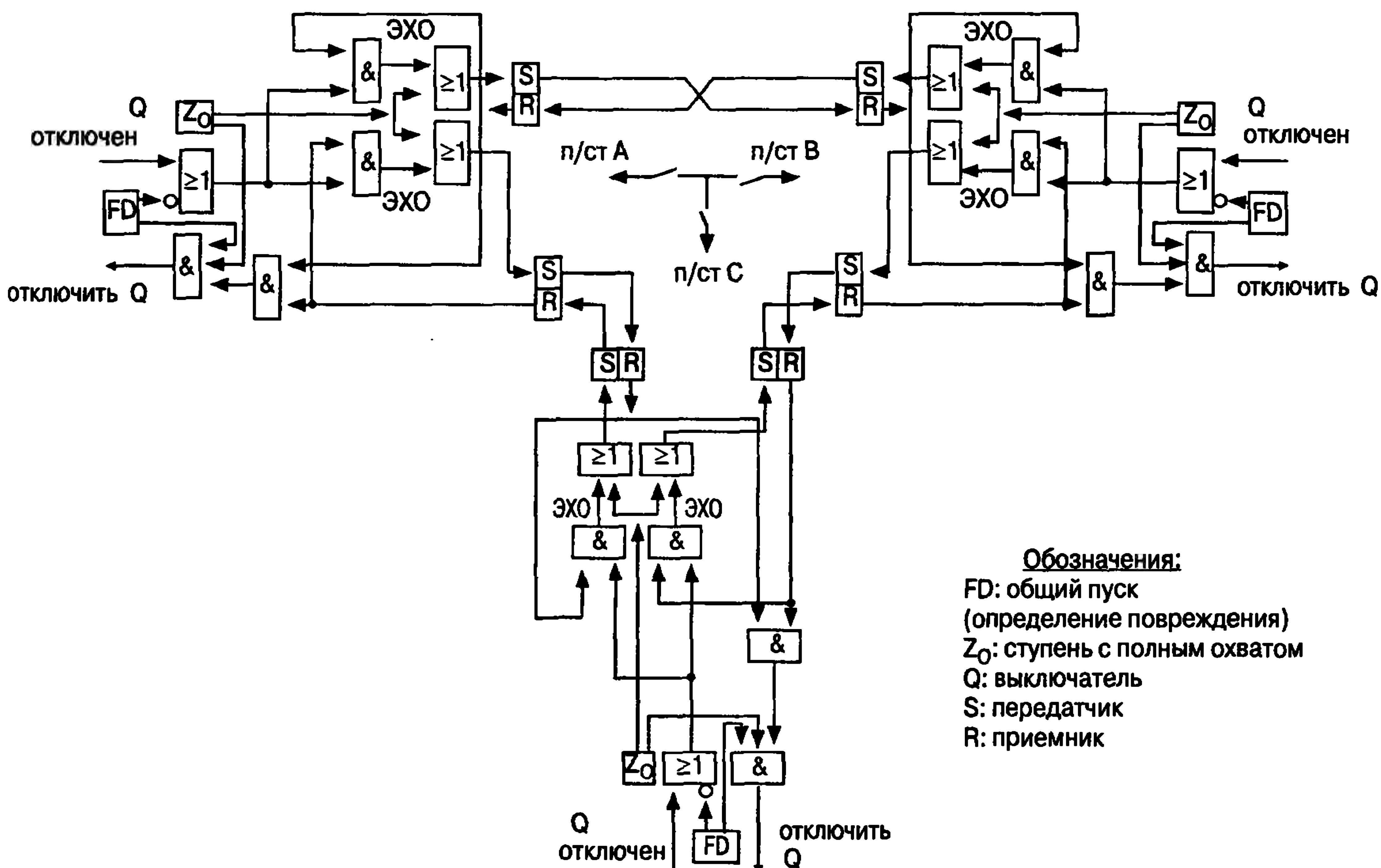


Рис. 5.41. Защита Т-образной линии с передачей разрешающего сигнала для ступени с полным охватом: функциональная схема

5.3.2.7 Линии с последовательной (продольной) компенсацией

Возможны следующие варианты [5.34].

УПК в центре линии, степень компенсации — < 50 %.

УПК в любой точке на линии, степень компенсации — > 50 %.

УПК на концах линии.

Трансформаторы тока УПК со стороны линии или шин.

В первом случае контур короткого замыкания всегда обладает индуктивным сопротивлением, как и на линиях без компенсации. Это означает, что запоминание напряжений для определения направления не требуется. При подключенной батарее компенсаторов длина линии кажется меньше. Коэффициент отстройки для ступени с неполным охватом в этом случае может быть меньше 50 %.

В качестве основной может быть использована только защита со сравнением направлений, основанная на ступенях дистанционной защиты с полным охватом защищаемой зоны. Возможно использование как схемы с разрешающим, так и с блокирующим сигналом.

Если УПК расположены по концам линии, при коротких замыканиях может возникнуть инверсия напряжения. Поэтому для определения направления необходимо запоминание напряжений (см. п.п. 3.5.6).

В этом случае используются реле 7SA6 и 7SA522, которые были спроектированы и прошли испытания на воздушных линиях с последовательной компенсацией. Они имеют «частотно-компенсированную память напряжений» достаточной продолжительности (до 2 с).

В определённых условиях при коротких замыканиях без зажигания дуги может иметь место инверсия тока. В таких случаях дистанционная защита не может быть использована как основная. Здесь необходимо использование защиты, основанной на измерении $\Delta U/\Delta I$ (защита, измеряющая приращения, или волновая защита).

Положение трансформаторов напряжения также имеет большое значение. Если трансформатор расположен со стороны линии, то сопротивление при замыкании на линии будет измерено правильно, тогда как при возникновении замыканий в противоположном направлении («за спиной защиты») измеренное значение сопротивления может оказаться меньше, чем реальное значение, и может произойти инверсия напряжения. При установке ТН на шинах картина обратная. Поведение защиты со сравнением направления и памятью напряжений в этом случае аналогично.

Вторая основная защита может быть выполнена при помощи дифференциальной защиты с передачей цифрового сигнала по оптоволоконным кабелям. В прошлом часто применялась дифференциально-фазная защита с PLC каналом.

Из-за субгармоник возникает так называемое «ползучее» изменение момента перехода тока через ноль, однако защита должна правильно его распознавать (независимые пороговые значения для положительной и отрицательной полярности тока при определении моментов перехода через ноль).

Токовая защита со сравнением направлений от замыканий на землю с большим активным сопротивлением должна быть значительно более грубой на линиях с последовательной компенсацией, т. к. несимметричное зажигание дуговых промежутков или наличие варисторов может вызвать протекание большого суммарного тока.

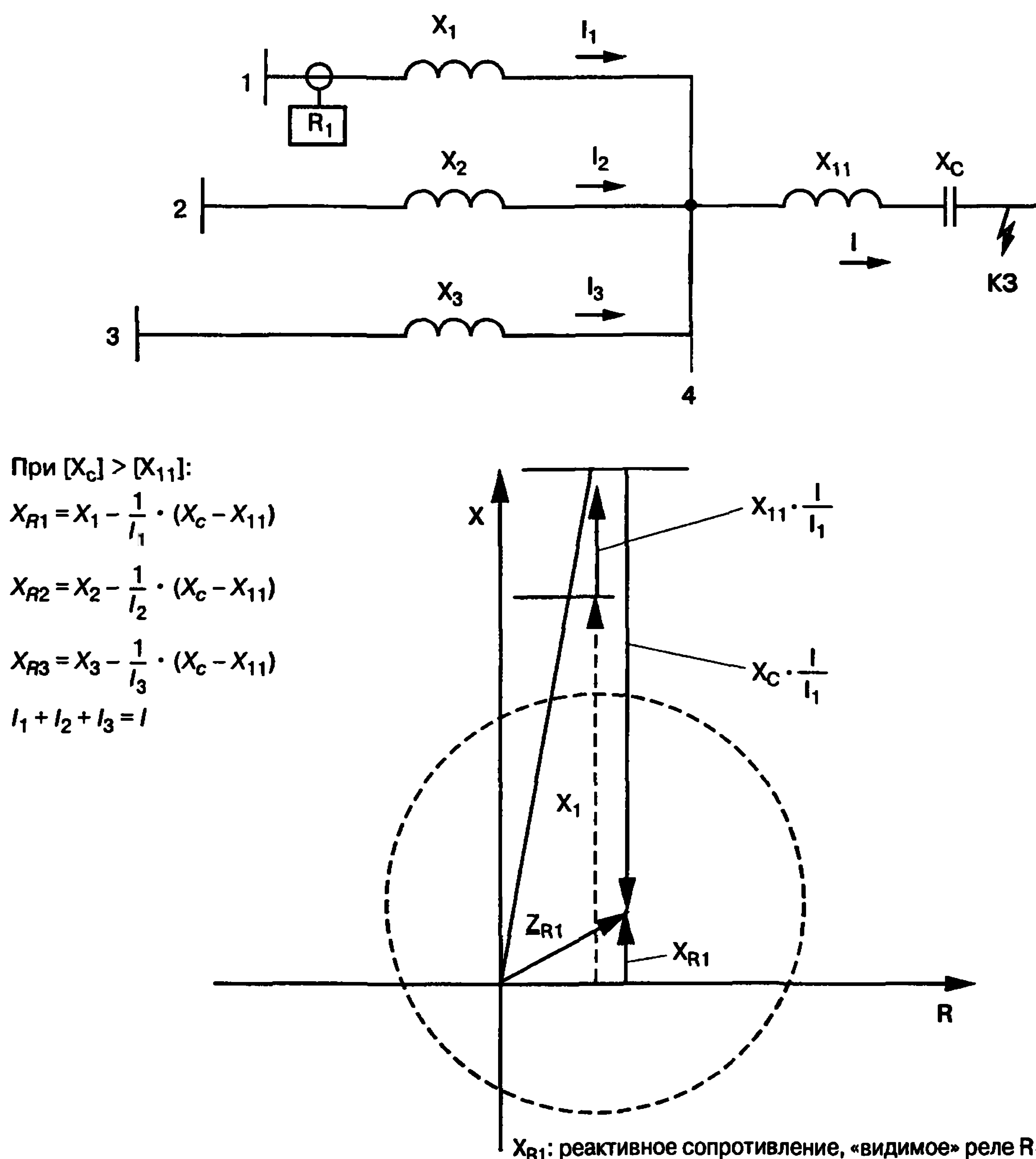


Рис. 5.42. Влияние продольной компенсации, на смежные линии

Анализ системы

При использовании продольной компенсации в любом случае необходим компьютерный анализ, который позволит изучить явления и возможное поведение защиты, описанные в п.п. 3.5.6. Необходимо заметить, что инверсия напряжения может возникнуть и на прилегающих линиях без продольной компенсации (рис. 5.42). Это означает, что прилегающие части сети также должны быть включены в рассмотрение.

6. Уставки защиты

Настройка устройства (параметризация) должна включать следующее:

а) выбор и активация требуемой защиты и дополнительных функций;

б) адаптация защиты к сети и измерительным трансформаторам;

в) конфигурирование интерфейса установки (ранжирование сигналов, команд управления, а также двоичных входов и выходов);

г) конфигурирование последовательных интерфейсов;

д) установка порогов срабатывания (уставок)

Настройка цифровых защит производится с помощью ПК. Защиты фирмы Siemens могут быть настроены при помощи программы DIGSI, работающей в операционной системе Windows [6.1, 6.2].

Задание параметров и процедуры настройки отдельных устройств подробно описаны в соответствующих руководствах по эксплуатации реле.

Рекомендации по настройке дистанционных защит описаны ниже.

6.1. Общие положения

Следующие параметры являются определяющими.

Данные системы: класс напряжения, конфигурация, удельное сопротивление линии, длина линии.

Данные измерительных трансформаторов: коэффициент трансформации.

Параметры питающей системы: мощность однофазного и трёхфазного короткого замыкания (максимальная и минимальная) или соответствующие сопротивления прямой и нулевой последовательности.

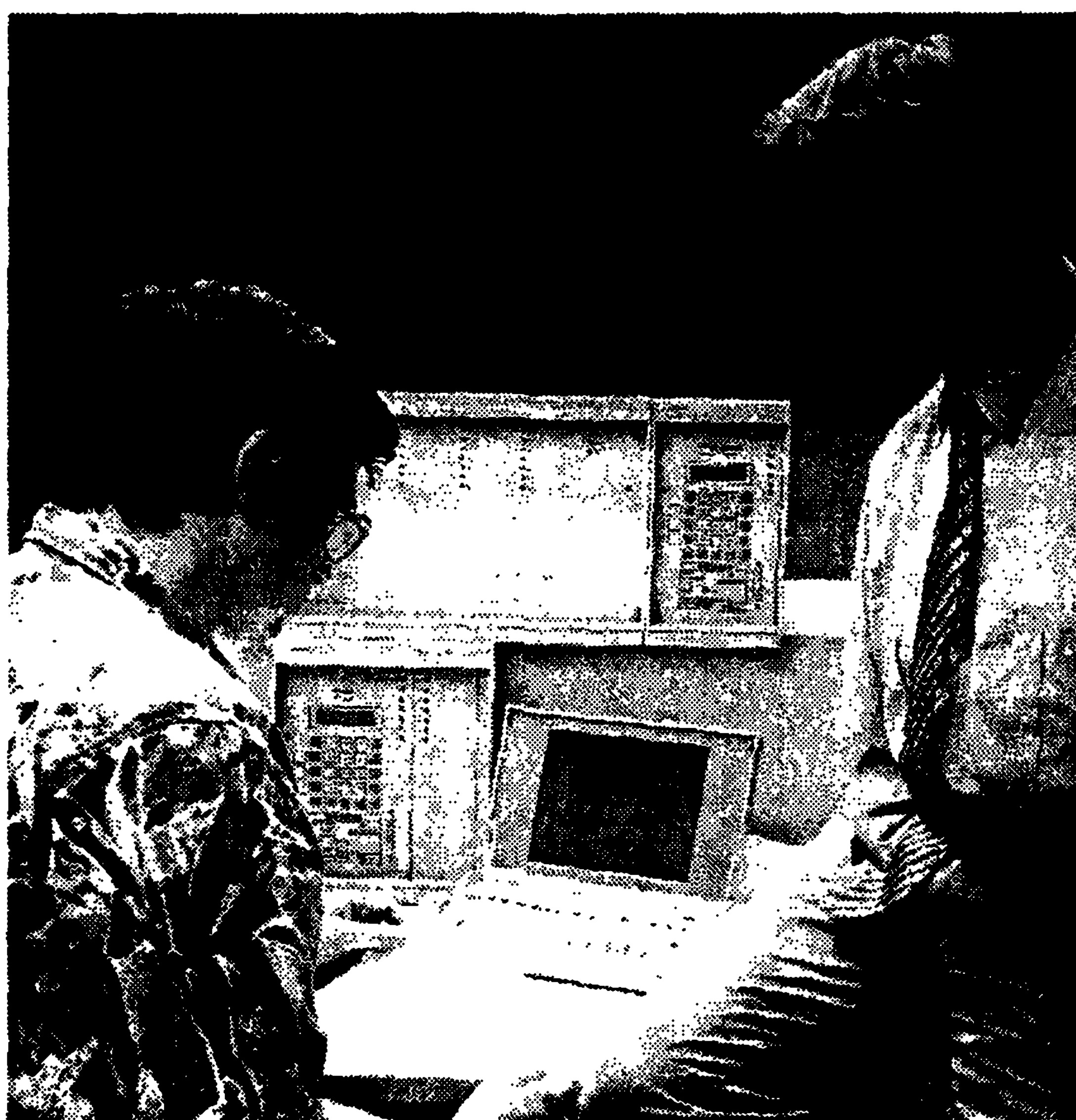


Рис. 6.1. Настройка защит с помощью PC

Нагрузка: максимальная активная и реактивная мощность нагрузки, зарядные токи.

Активное сопротивление в точке замыкания (переходное): длина гирлянды изоляторов, расстояние между проводниками, твёрдость почвы (состав, состояние грунта).

В зависимости от конкретного применения также необходимо рассматривать следующие условия.

Переходные процессы: качания мощности (максимальной частоты), пусковые токи (кабеля, трансформатора, двигателя).

Последовательная компенсация, и явления, с ней связанные.

В цифровых дистанционных защитах заложены *оптимизированные характеристики*, а уставки можно изменять в широком диапазоне. Кроме того возможна динамическая адаптация уставок к режиму работы системы и нагрузке при помощи хорошо продуманного переключения различных наборов параметров (адаптивная защита).

Однако при выборе уставки всегда необходимо находить компромисс между чувствительностью, быстродействием и селективностью.

6.2. Обнаружение коротких замыканий (третья ступень)

В этом случае целью является получение максимальной зоны действия и чувствительности без нарушения устойчивости в нагрузочных режимах и при переходных процессах.

В дистанционных защитах односистемного типа (реле 7SA511) пусковой орган должен срабатывать селективно для правильного выбора повреждённой петли логическими цепями и селективного отключения фазы и последующего ОАПВ.

В полносхемных цифровых дистанционных защитах (7SA6, 7SA522) не требуется фазо-селективный пусковой орган для определения повреждённой петли. В этом случае пусковой орган играет роль ненаправленной ступени дальнего резервирования (4-ая ступень). Во многих случаях используются только три ступени. Тогда пусковой орган является третьей ступенью.

Примечание:

В полносхемном реле 7SA6 предусмотрена функция направленного (*U*/*I*/φ) пуска, что соответствует существующей Европейской практике релейной защиты.

6.2.1. Способы пуска защиты и подход к выбору уставок пусковых органов (ПО)

Имеется различие между устройствами дистанционной защиты с общим пусковым органом и без него (см.п.п.3.1.8).

В первом случае в устройстве защиты присутствует независимая пусковая ступень в дополнение к дистанционным ступеням. Она выполняет функции пускового органа, избирателя повреждённой петли, а также осуществляет общее управление выдержками времени.

Во втором случае каждая ступень работает независимо. В явном виде пусковой орган отсутствует.

Дистанционные реле с пусковым органом.

В распределительных сетях Европы традиционно используются переключаемые дистанционные устройства с токовыми и комбинированными (U/I) пусковыми органами, при выборе уставок которых учитываются максимальные токи нагрузки и максимальные рабочие напряжения. При этом уставки защит во всей сети имеют примерно одинаковые значения.

Направленный пуск (*U*/*I*/φ) и пуск по сопротивлению обычно используются на длинных линиях ВН. При выборе уставок необходимо дополнительно учитывать перетоки реактивной мощности, т.е. наименьшее значение cos φ.

Для обеспечения согласования в цифровых защитах немецких производителей эта традиция продолжена использованием в устройствах улучшенных характеристик направленных ПО. Дополнительно имеются пусковые органы сопротивления, что соответствует зарубежной практике построения релейной защиты сетей. В последнем случае выбор уставки определяется сопротивлениями линий и нагрузки.

Ранние реле 7SA511 (односистемные) и 7SA513 (полносхемные) были разработаны в соответствии с этой концепцией. Теперь же пользователь имеет возможность выбора типа пускового органа при параметрировании защиты.

Дистанционные реле без пусковых органов.

Эта концепция уже давно используется англосаксонскими производителями.

В этом случае каждая зона является независимой. Повреждение обнаруживается и фиксируется, когда измеренное сопротивление попадает в какую-либо зону.

Наибольшая уставка реактивного сопротивления (X-направление) определяет зону срабатывания защиты при дальнем резервировании. Наибольшая уставка активного сопротивления определяет максимальное активное переходное сопротивление, при котором происходит срабатывание, и должна быть выбрана с учётом максимальной нагрузки линии. Обычно характеристика срабатывания 3-й ступени имеет ограничение в обоих направлениях.

В современных реле характеристика срабатывания может иметь конусообразный вырез (см. п.п. 3.1.6, рис. 3.20), который ограничивает зону действия ступеней в R-направлении при определённых углах нагрузки и делает реле менее чувствительным к изменениям нагрузки.

Правила выбора уставок третьей ступени и зоны блокирования нагрузки те же, что и для отдельных ПО.

Устройства 7SA522 и 7SA6 выполнены по такому принципу (в 7SA522 возможно, по выбору, использование направленного пуска с общим управлением выдержками времени ступеней).

6.2.2. Надёжность обнаружения коротких замыканий

Необходимая область определения замыкания зависит от выбранной концепции защиты.

При использовании удалённой резервной защиты обнаружение замыкания должно быть обеспечено на 100 % длины всех смежных линий для того, чтобы в случае отказа выключателей или защит на смежных линиях резервная защита надёжно сработала.

При установке двух основных защит (дублирование) и местного резервирования (УРОВ) пусковой орган, определяющий повреждение, должен, в принципе, охватывать только защищаемую линию с запасом примерно 20—30 %. Эта концепция защиты обычно используется в магистральных сетях вне территории Германии. Причём и в этом случае пытаются получить максимально возможную зону определения замыканий.

В любом случае надёжность определения замыканий в конце требуемой зоны защиты должна быть проверена при помощи анализа критериев срабатывания $U_{КЗ}$, $I_{КЗ}$, $\varphi_{КЗ}$ и $Z_{КЗ}$ в месте установки реле. При этом расчёты должны быть проведены с учетом максимально возможной промежуточной подпитки.

Дополнительно важно помнить, что ток нагрузки может иметь отрицательное воздействие, т. к. он уменьшает угол короткого замыкания (см. п.п. 5.2, рис. 5.23).

Переходное сопротивление в месте замыкания имеет аналогичное влияние. Это относится к постоянным сопротивлениям, например, к сопротивлению эффективно заземлённой опоры (необходимо учитывать его уменьшение при наличии заземляющих тросов, см. п.п. 3.5.1, рис. 3.109).

При этом следует учитывать, что дуга характеризуется постоянным напряжением, но не сопротивлением. С другой стороны, наличие источника питания на противоположном конце линии приведёт к нереально большим значениям R (см. п.п. 3.5.1).

При учёте всех влияющих факторов расчёты несколько усложнятся. Поэтому для оценки надежности пуска рекоменду-

ется использование специальной программы расчёта. Эта программа выбирает и автоматически проверяет критерии пуска в месте установки реле для конкретных точек замыканий в системе.

6.2.3. «Нагрузочная способность» защиты

Резервные ступени дистанционной защиты с характеристикой срабатывания в виде окружности имеют большую область срабатывания в направлении действительной оси и поэтому склонны к излишнему срабатыванию при перегрузке линии. На рис. 6.2 отображена ситуация полного отключения, имевшая место в 2003 году на северо-западе США и в Канаде. Использование характеристики срабатывания в виде многоугольника или с функцией блокировки в нагрузочном режиме позволило бы избежать данной ситуации.

Необходимо уточнить, что проблема появилась именно из-за использования

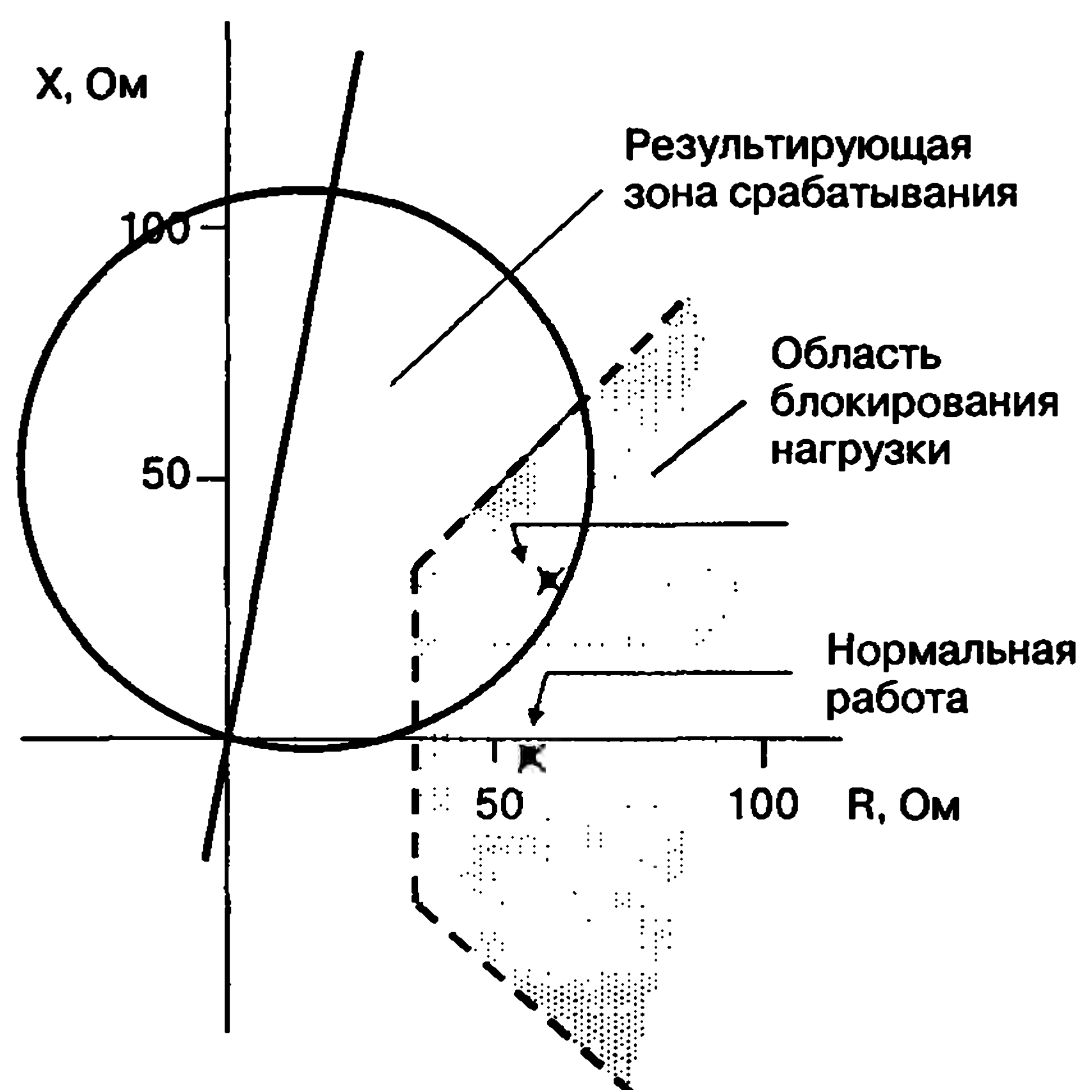


Рис. 6.2. Срабатывание дистанционного реле при перегрузке и снижении напряжения (ситуация полного отключения 2003 г.)

направленной характеристики срабатывания в виде окружности.

Эта особенность 3-ей ступени несколько раз приводила к полным отключениям и заставила NERC (Северо-Американский Совет по надёжности энергоснабжения) выпустить рекомендации для предупреждения и уменьшения вероятности возникновения каскадных полных отключений в будущем [6.3] Рекомендация 8а.

Оценить уставки 3-ей ступени с целью проверки того, что третья ступень защиты не произведёт ложного отключения в наиболее тяжёлом нагрузочном режиме:

3-я ступень не должна срабатывать при повышении тока в пределах 150% допустимого значения при снижении напряжения до 0,85 номинального и при угле линии выше 30°;

уставки 3-ей ступени выбираются допускающими 20 минутную перегрузку (системным операторам необходимо 20 минут для того, что снизить нагрузку после обнаружения режима перегрузки);

дистанционные реле не должны быть использованы для защиты от перегрузки;

защита не должна срабатывать во всех распознаваемых режимах качаний.

Предел «нагрузочной способности» реле — это предельное значение нагрузки в MVA, при котором реле находится на грани срабатывания. Его можно оценить следующим образом.

Предполагая значение напряжения равным номинальному, получаем, что значение сопротивления срабатывания реле Z_φ при заданном угле φ на диаграмме сопротивления соответствует следующему значению полной мощности нагрузки:

$$S_\varphi = \frac{U^2_{\text{лин.ном}}}{(k_U/k_I)\cdot Z_\varphi} \quad (6.1)$$

где $U_{лин.ном}$ — номинальное линейное напряжение [кВ]; k_U, k_I — коэффициенты трансформации ТН и ТТ; Z_φ — вторичное сопротивление срабатывания реле [Ом].

«Нагрузочная способность» реле зависит от характеристики срабатывания реле и диапазона изменения угла нагрузки ($\cos\varphi$). Это хорошо показывает следующий пример.

Пример.

Дано: $U_{ном}$ = 230 кВ;
линия: l = 200 км, Z_{L1} = 60 Ом; φ_L = 79°;
нагрузка: $S_{норм}$ = 290 МВА; $S_{терм}$ = 542 МВА ($I_{терм}$ = 1360 А);

Защита: реле сопротивления с МНО-характеристикой; $\varphi_{м.ч.} = \varphi_L$; уставка третьей ступени охватывает следующую линию (Z_{L2} = 30 Ом) с запасом в 25%

Первичное сопротивление срабатывания

$$Z_{R3} = 1{,}25\,(Z_{L1} + Z_{L2}) = 1{,}25(60 + 30) = 112{,}5 \text{ Ом}.$$

Найти: максимальную допустимую нагрузку линии, при которой реле находится на грани срабатывания при φ = 30°.

Решение: сопротивление срабатывания (первичное) при угле нагрузки φ равно (см.п.п.3.1.4, формула 3.2):

$$Z_{\varphi\text{-МНО}} = Z_R\cos(\varphi_{м.ч.} - \varphi) = 112{,}5\cos(79° - 30°) = 112{,}5 \cdot 0{,}656 = 73{,}8 \text{ Ом}$$

В соответствии с (6.1)

$$S_\varphi = \frac{U^2_{ном}}{Z_\varphi} = \frac{230^2}{73{,}8} = 717 \text{ МВА}$$

Результаты представлены на рис.6.3.

Комментарий

При номинальном напряжении по линии может быть передана мощность

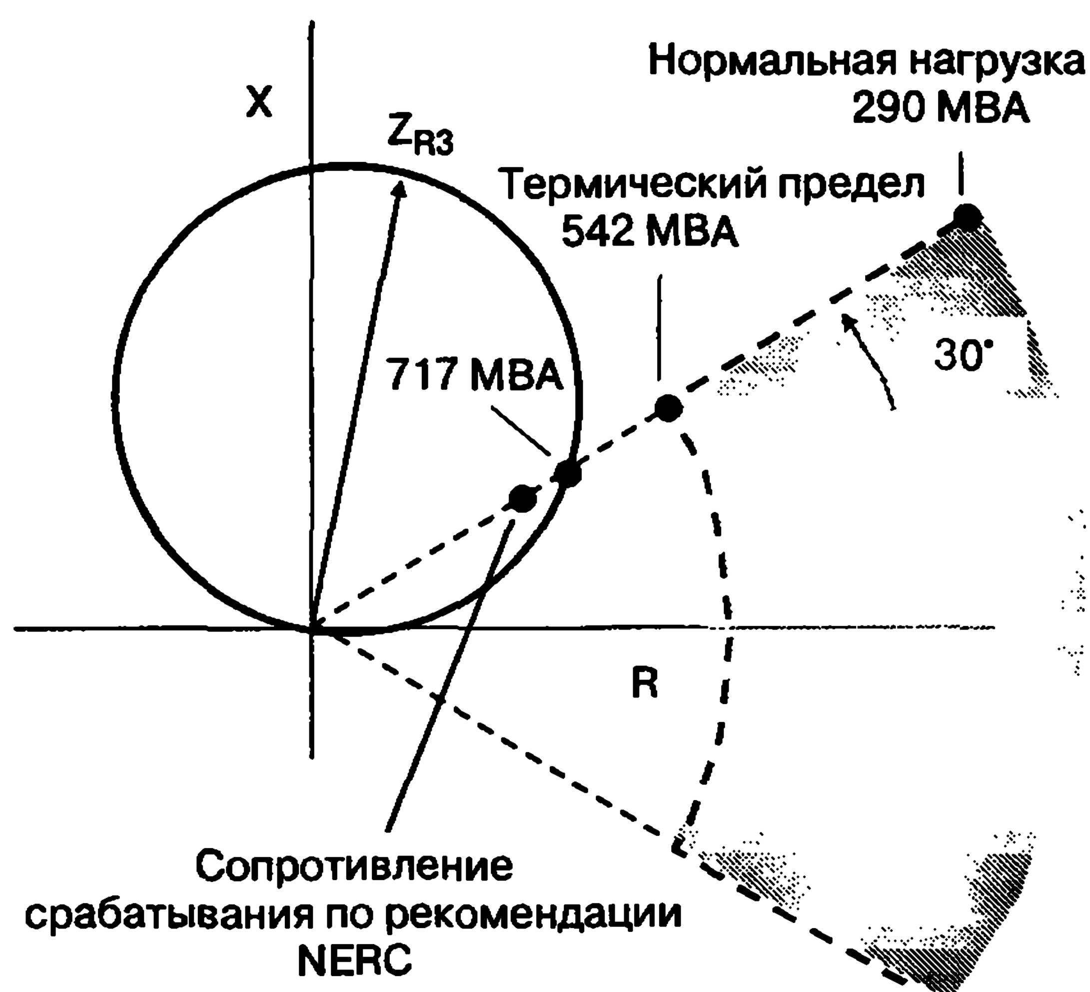


Рис. 6.3. МНО-характеристика с зоной блокирования нагрузки («нагрузочная» способность реле)

$S_{терм}$ = 542 МВА с запасом, равным $\frac{717 - 542}{717} = 0{,}24$, т. е. 24%.

При возможном снижении напряжения до 0,85 номинального значения в результате нарушений работы в системе и той же передаваемой мощности сопротивление, измеряемое реле, снижается до значения:

$$Z_{наруш} = \frac{0{,}85U_{ном}/\sqrt{3}}{I_{терм}} = \frac{0{,}85 \cdot 230/\sqrt{3}}{1{,}360} = 83 \text{ Ом},$$

при этом запас по надежности снижается до 12%.

Расчет, выполняемый в соответствии с рекомендациями NERC при $I_{нагр} = 1{,}5\,I_{терм}$, показывает, что в этом случае сопротивление, измеряемое реле, будет равно 55,3 Ом и попадает в зону срабатывания (внутрь МНО-характеристики).

Поэтому необходима зона блокирования, как показано на рис.6.3.

6.2.4. Фазная селективность

Фазная селективность определения замыкания необходима для выбора измеряемых сигналов в случае использования дистанционной защиты с переключением входных величин, а также для реализации алгоритма (логики) отключения при использовании однофазного АПВ.

Если для определения замыкания используется токовый пусковой орган, его уставка должна иметь достаточно большое значение для того, чтобы избежать пуска измерительной системы в неповрежденных фазах в режимах перегрузок или в переходных режимах (см. п.п. 3.1.6). Уставка комбинированного пускового органа или органа определения замыкания по сопротивлению в цифровых реле 7SA5, однако, не является очень важной, т. к. дополнительные проверки достоверности (сравнение сопротивлений) автоматически предотвратят излишнее срабатывание измерительных систем на «здоровых» фазах.

Это относится к коротким линиям или линиям средней длины (до 100 км).

На очень длинных линиях, длина которых значительно больше 100 км, и сильно нагруженных линиях сопротивление нагрузки имеет тот же порядок, что и сопротивление короткого замыкания, поэтому сравнения сопротивлений недостаточно.

В этом случае рекомендуется использование реле 7SA6 или 7SA522, т. к. в них заложены дополнительные алгоритмы обеспечения фазной селективности.

Поэтому нет необходимости в жёстком ограничении области отключения, как в случае использования электромеханических или аналогово-статических защит (см. п.п. 3.1.6, рис. 3.19).

Определение повреждённой фазы при однофазных замыканиях на землю (это важно при использовании ОАПВ) обеспечивается при помощи сравнения фаз токов нулевой и обратной последовательности, соответствующих характерному распределению симметричных составляющих при однофазных замыканиях[23]. Дополнительно токи нагрузки, протекающие до возникновения замыкания, запоминаются и далее вычитаются из полного тока замыкания. Таким образом, для сравнения используются аварийные составляющие токов КЗ[24].

Использование принципа наложения в электрических цепях обеспечивает получение «чистых» параметров замыкания даже, когда ток КЗ равен части тока нагрузки.

В этом случае использование специальных уставок не требуется.

6.2.5. Уставки органа определения КЗ по U-I-φ-критерию (направленного ПО)

Характеристика срабатывания представлена в п.п. 3.1.6 на рис. 3.17. Обычно защита настраивается так, что при отсутствии тока в земле измерения производятся в междуфазных контурах, а при обнаружении тока в земле производится переключение на измерения в контурах фаза—земля.

В большинстве случаев используются следующие уставки:

Параметр	Типичная уставка
$I_ф>$	$0,25 \cdot I_{ном}$

[23] Этот способ уже опробован в аналогово-статических реле. В устройствах 7SA522 и 7SA6 он также используется для выбора фазы в защите от однофазных замыканий со сравнением направлений мощности по концам защищаемой линии. Устройства позволяют определять замыкания с токами, равными 10 % от номинального.

[24] Эти токи определяются в схеме замещения, когда в точке замыкания находится источник ЭДС с напряжением, которое существовало до возникновения замыкания, но противоположной полярности. Действительные источники закорочены.

Продолжение табл.

Параметр	Типичная уставка
$U_{(I>)}$	70 % $U_{ном}$
$I_{ф>>}$	2,50 · $I_{ном}$
$U_{(I>>)}$	90 % $U_{ном}$
$I_{φ>>}$	1,00 · $I_{ном}$
$U_{(Iφ>>)}$	90 % $U_{ном}$
φ >	45 °эл.
φ <	110 °эл.
$I_E>$	0,25 · $I_{ном}$ в системах с заземлённой нейтралью; 0,5 · $I_{ном}$ в системах с изол./компенсир. нейтралью
$U_E>(3 \cdot U_0>)$	20 В* в системах с заземлённой нейтралью; — не эффективно в сист. с изол./компенс. нейтралью
*100 В соответствует полному смещению нейтральной точки звезды на $U_{ном}/\sqrt{3}$.	

Для измерительных систем фаза—фаза и фаза—земля используются одинаковые уставки. При междуфазной системе измерений используется междуфазное напряжение $U_{ф-ф}$ (100 В вторичное напряжение), для системы измерений фаза—земля — фазное $U_{ф-E}$ (58 В).

Могут оказаться полезными следующие рекомендации.

- Относительно высокая уставка $I_{ф>>}$ = = 2.50 · $I_{ном}$ получается при учёте того, что ток в защите может возрасти при отключении параллельной линии. На одноцепных линиях (радиальные линии) уставка может быть снижена до 1.3 · $I_{ном}$, если в нагрузочном режиме ток не может быть больше максимального тока нагрузки и токов самозапуска. Уставка U $(_{I>>})$ в этом случае должна быть снижена до 80 % от $U_{ном}$.
- На длинных линиях, где не осуществляется передача большой реактивной мощности, а токи КЗ меньше номинального тока, уставка $I_{φ>>}$ может быть ниже номинального тока (например, 0,5 · $I_{ном}$).
- При срабатывании токового органа с уставкой I_E >, фиксирующего появление тока в земле, направленный пусковой орган «переключает» измерительные цепи с петли фаза—фаза на петлю фаза—земля. В цифровых реле 7SA6 этот порог срабатывания стабилизирован фазным током для предупреждения ложного срабатывания при больших токах КЗ и насыщении ТТ.

  Уставка 0,5 · $I_{ном}$ применяется в системах с изолированной и заземленной через дугогасящую катушку нейтралью с недокомпенсированным током в земле, равным ~0,35 · $I_{ном}$. В сильно компенсированных сетях, где токи в земле при однофазных замыканиях имеют большие значения, порог срабатывания должен быть увеличен (I_E > = 1,3 · I_{CE}). В предельном случае орган определения замыкания на землю должен быть отключен (уставка «неэффективно»).

  Двойные замыкания на землю определяются при помощи междуфазного органа определения замыканий.
- В системах с заземлённой нейтралью уставка по U_E> всегда должна быть введена, если не все нейтральные точки трансформаторов заземлены. Поэтому правильный контур фаза—земля измеряется и в тех частях системы, где в случае замыканий на землю ток в земле отсутствует (см. п.п. 3.1.6, рис. 3.15). Если цифровые реле 7SA6 настроены для работы в сетях с изолированной/компенсированной нейтралью, то уставка U_E> органа определения замыка-

ний автоматически выводится. Поэтому, неправильное обнаружение повреждения при однофазном замыкании на землю невозможно.

6.2.6. Уставки органа определения КЗ по полному сопротивлению

В ранних устройствах 7SA511 и 7SA513 управление всеми ступенями защиты осуществлял общий пусковой орган (см. п.п. 3.1.8).

В реле 7SA6 и 7SA522 такой ПО отсутствует и каждая ступень работает независимо. Обсуждаемые здесь уставки относятся к ступени с наибольшей зоной срабатывания и предусмотренной зоной блокирования нагрузки.

Исходной величиной в этом случае является передаваемая мощность при номинальном напряжении и номинальном токе ТТ: $S_{ном} = U_{ном} I_{ном} \sqrt{3}$.

Пример 6.1.

$U_{ном}$ = 110 кВ и ТТ 600/1 А.

$$S_{ном} = 110 \cdot 10^3\,В \cdot 600 \cdot \sqrt{3}\,А = 66 \cdot \sqrt{3}\ МВА.$$

При этой мощности реле измеряет вторичное сопротивление нагрузки

$$Z_{нагр.вт} = \frac{U_{ном\,(вт)}/\sqrt{3}}{I_{ном\,(вт)}} = \frac{100В/\sqrt{3}}{1А} =$$
$$= 57{,}7\ Ом.$$

Предполагается использование трансформаторов с вторичным током 1 А и напряжением 100В[26]. Номинальный ток реле соответствует номинальному току ТТ.

[26] При использовании трансформаторов тока с вторичным током 5А сопротивление нагрузки уменьшится в 5 раз.

Комментарий.

В дальнейшем предполагается, что номинальный ток трансформаторов тока соответствует натуральной нагрузке линии (длинная линия ⩾ 100 км) или максимальной, допустимой по условиям нагрева нагрузке линии. Более того, предполагается, что по линии могут протекать токи, в два раза превышающие номинальные токи ТТ в случае, если параллельная линия или часть сети отключены.

Если трансформаторы тока имеют большие первичные номинальные токи, то вторичный ток в реле уменьшается, а вторичное сопротивление соответственно увеличивается. (см. выражение (3.1) в п.п. 3.1.2).

В этом случае уставки для тока срабатывания должны быть уменьшены, а уставки сопротивлений увеличены в соответствующее число раз.

При протекании по линии удвоенного номинального тока трансформатора измеряемое рабочее сопротивление уменьшается вдвое (в рассмотренном примере: 29 Ом). Если принять запас в 20 %, коэффициент возврата 1,05 и учесть другие влияющие параметры (см. ступенчатые диаграммы защиты), максимальную чувствительность срабатывания получаем при следующем значении сопротивления:

$$Z_{FD(max)} = \frac{57{,}7}{2} \cdot 0{,}8 = 23\ Ом.$$

Допускаемая зона в R-направлении многоугольной характеристики срабатывания реле 7SA522 и 7SA6 определяется в зависимости от максимального угла нагрузки линии $\varphi_{нагр}$ по следующему выражению (рис. 6.4):

$$R_{нагр.\,доп} = R_{нагр(max)} = Z_{нагр(min)} \cdot \cos\varphi_{нагр}.$$

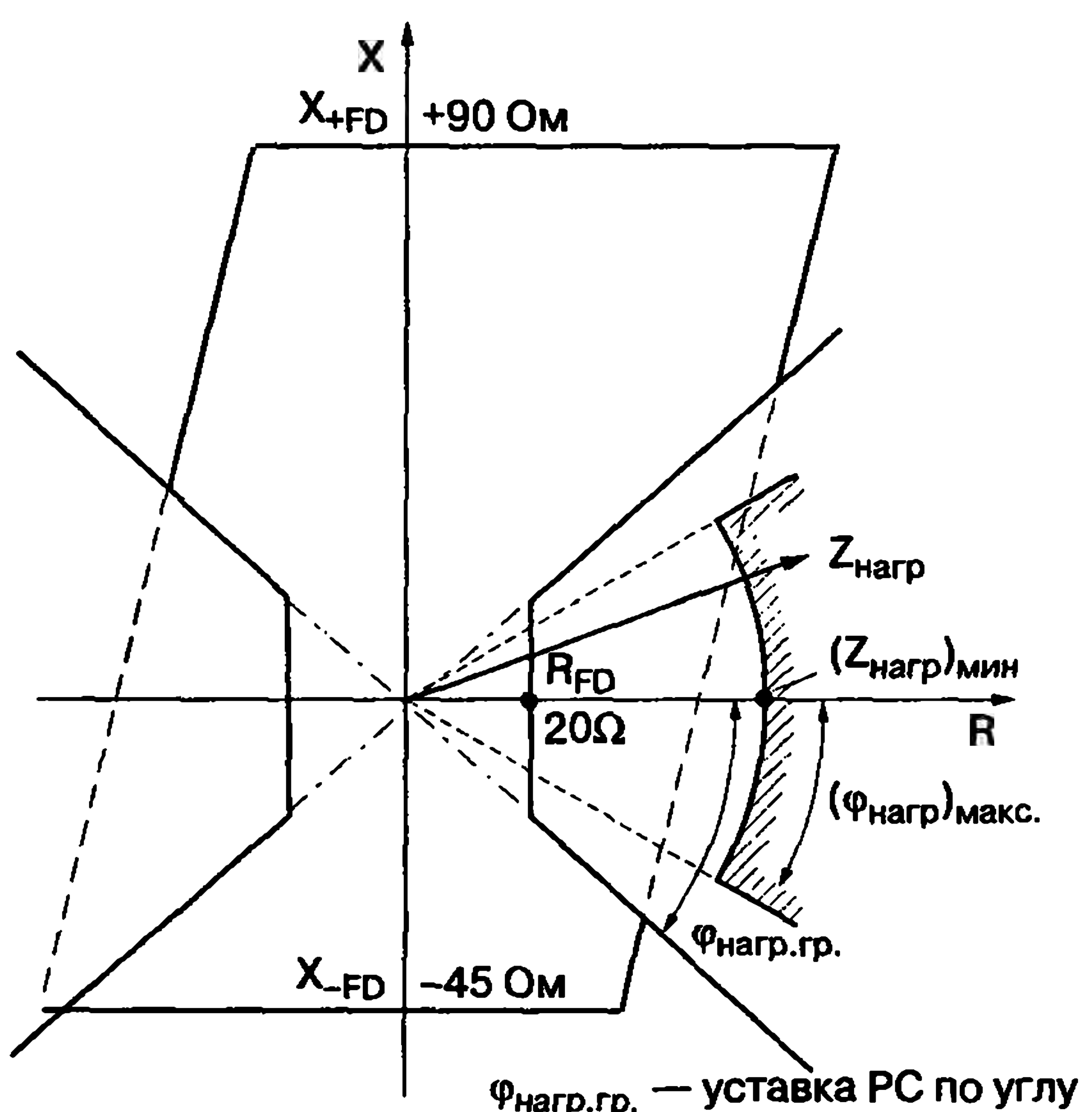


Рис. 6.4. Уставки пускового органа сопротивления: максимальная уставка в R-направлении

При максимальном угле нагрузки $\varphi_{нагр}$ = ± 30° максимальная зона в R равна приблизительно 20 Ом.

Предельный угол «вырезанного» участка для отстройки от нагрузочного режима должен быть больше $\varphi_{нагр\ (max)}$, а угол запаса должен быть не менее 5°. Тогда $\varphi_{нагр.гр}$ = 35°. На линиях короче 100км возможны большие перетоки реактивной мощности. В этом случае может быть использовано значение угла $\varphi_{нагр.\ гр}$ = 45°, устанавливаемое по умолчанию.

Если необходимо обнаруживать замыкания с токами, равными номинальному току линии, при углах КЗ больше 35° и номинальном напряжении ($U = U_{ном}$), то сопротивление срабатывания при таком угле должно быть равно приблизительно 58 Ом. Это выполняется при уставке R_{FD} = = 50 Ом (рис. 6.4).

Область действия 3-ей ступени в направлении оси *X* должна охватывать наиболее длинную смежную линию с запасом в 25%. Промежуточный источник питания также должен быть учтён. На длинных линиях уставка, удовлетворяющая таким условиям, может быть равна 200Ом (1А). В данном примере она равна 90 Ом, т.к. рассматривается линия средней длины.

Для ограничения области срабатывания в обратном направлении может быть использована та же уставка, что и для ограничения области срабатывания в прямом направлении. Однако, как правило, достаточно уставки, равной половине уставки срабатывания в прямом направлении. В данном примере она равна 45 Ом.

Для более точного определения уставки ПО по сопротивлению необходимо проведение расчётов с учётом сопротивления линии. Для этого необходимо учитывать влияние промежуточного источника подпитки. Проведение такого расчёта рекомендуется при выборе уставок защит в магистральных сетях.

Это проиллюстрировано на следующем примере.

Пример.

Расчёт уставок ПО с пуском по сопротивлению

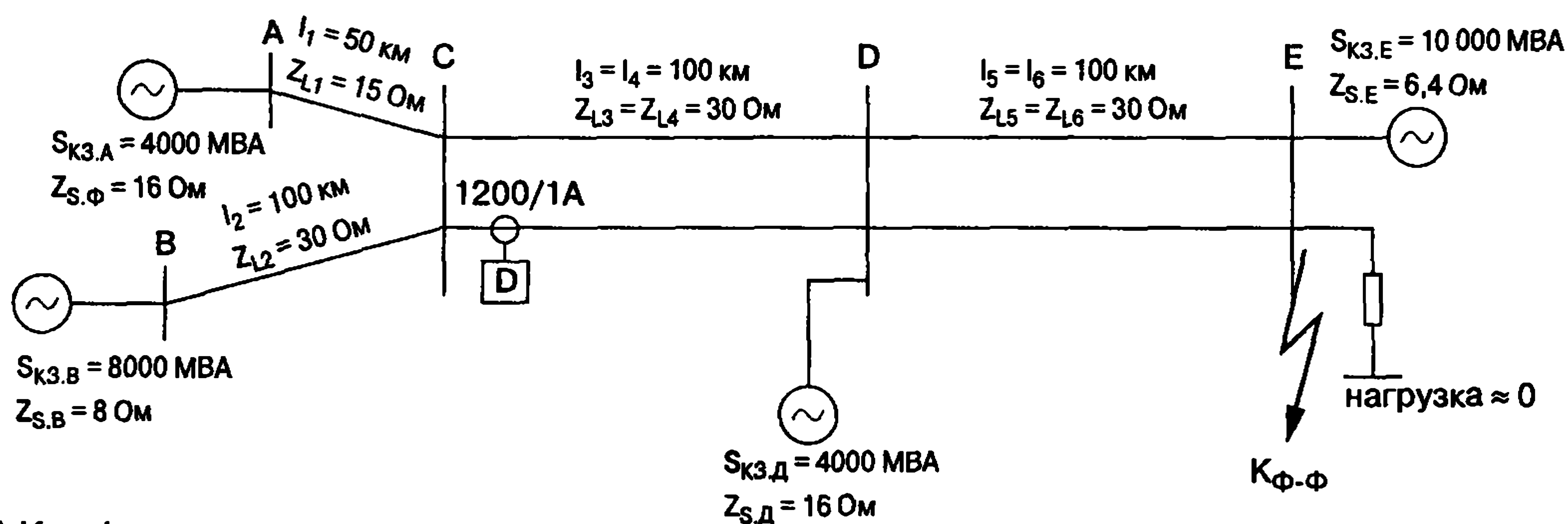
Задание.

Рассматриваемая сеть представлена на рис. 6.5. Необходимо рассчитать уставки пускового органа защиты D. Зона действия пускового органа должна включать в себя всю смежную линию в прямом направлении, охватывая ее с запасом ~30 %.

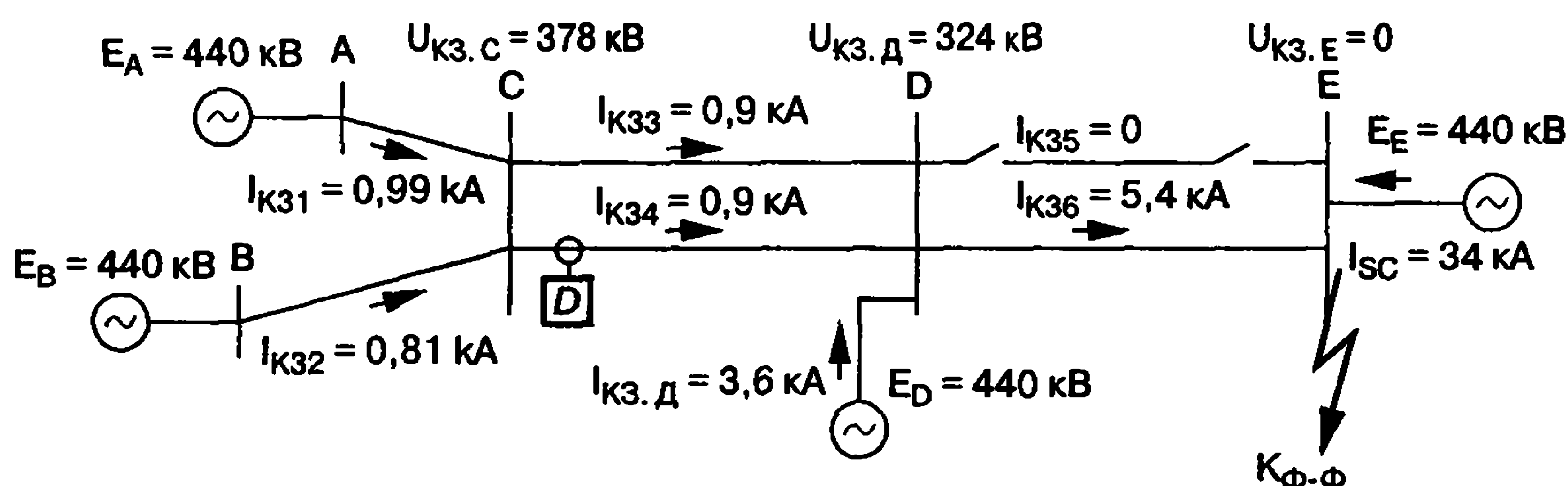
В обратном направлении зона действия пускового органа должна охватывать с запасом не менее 30 % наиболее длинную линию.

Решение.

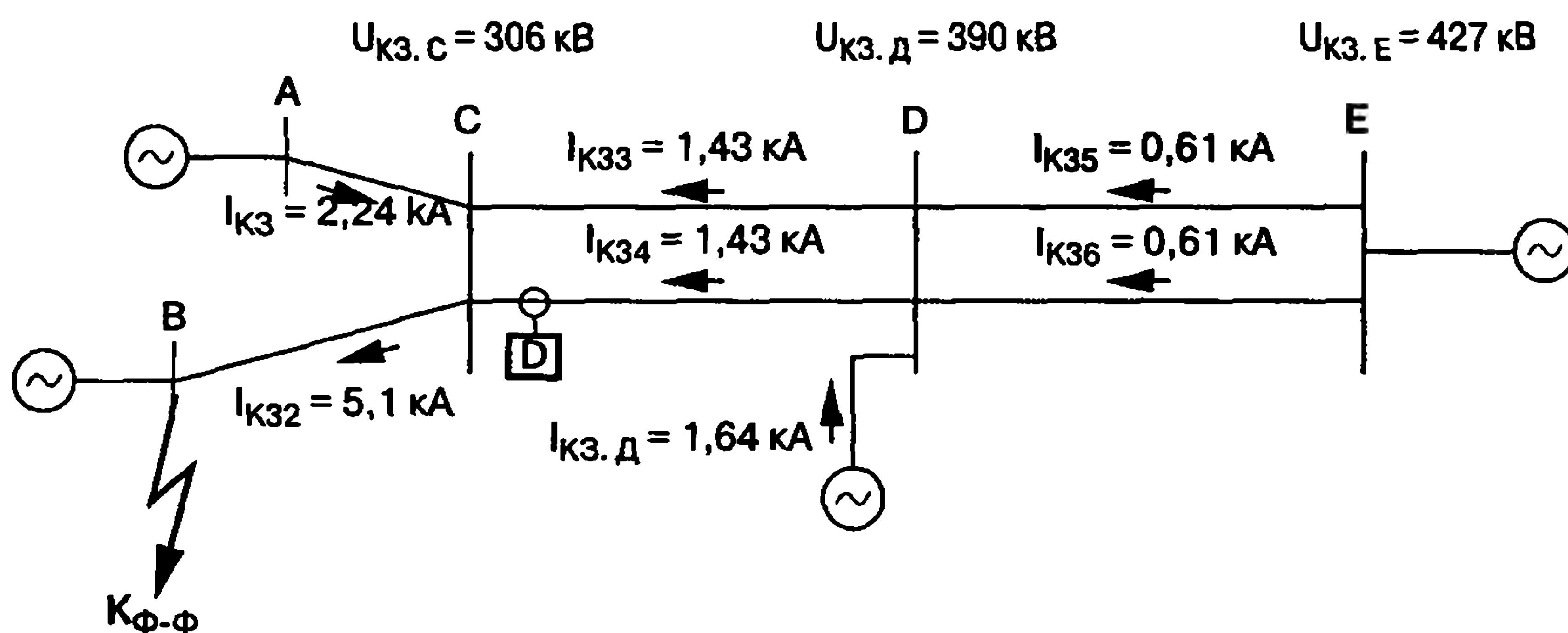
Сначала необходимо провести расчёт для междуфазных КЗ на шинах подстанции Е. Для упрощения расчётов можно использовать только реактивные сопротивления, т. к. активные сопротивления линии СВН малы ($R < 0{,}1 \cdot X$).



а) Конфигурация и параметры сети



б) Распределение токов и напряжений при междуфазном КЗ на шинах Е



в) Распределение токов и напряжений при междуфазном КЗ на шинах В

Рис. 6.5. Пример расчета: распределение токов и напряжений

Наиболее неблагоприятными являются условия, когда одна из трёхфазных параллельных линий D—E отключена.

Токи коротких замыканий в этом случае указаны на рис. 6.5, б. Линейное напряжение КЗ в месте установки реле равно 378 кВ, а ток короткого замыкания равен 900А. Измеренное реактивное сопротивление в соответствии с выражением (3.24) равно:

$$Z_{Ф—Ф} = \frac{378000}{2 \cdot 900} = 210 \text{ Ом}.$$

Из-за влияния промежуточного источника питания собственное сопротивление

линии, равное 2 · 30 = 60 Ом, увеличивается в 3,5 раз.

С учётом запаса в 30 % получаем следующее первичное значение уставки:

$X_{+Aперв} = 1{,}3 \cdot 210 = 273$ Ом.

Коэффициент приведения сопротивления к вторичной стороне измерительных трансформаторов

$$k_z = \frac{k_I}{k_U} = \frac{1200/1}{400/0{,}1} = 0{,}3.$$

Тогда получаем следующее значение уставки:

$X_{+FDвторичн} = 0{,}3 \cdot 273 = 81{,}9$ Ом.

Выбираем уставку 90 Ом.

Наиболее неблагоприятные условия при замыканиях в обратном направлении соответствуют повреждению на шинах В. Результаты расчёта токов КЗ приведены на рис. 6.5, в.

Сопротивление, измеренное в обратном направлении:

$$Z_{Ф-Ф} = \frac{306}{2 \cdot 1{,}43} = 107 \text{ Ом}.$$

В этом случае промежуточный источник питания вызывает увеличение сопротивления линии в 3,6 раз.

Тогда уставка пускового органа в обратном направлении равна:

$X_{-FDвторичн} = 1{,}3 \cdot 0{,}3 \cdot 107 = 42{,}0$ Ом; выбираем 50 Ом.

Натуральная нагрузка каждой цепи воздушной линии 400 кВ между шинами подстанции С и D равна 460 МВт. Это соответствует току нагрузки:

$$I_{нагр} = \frac{P_{нат}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{460 \text{МВт}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{кВ}} = 664 \text{ А}.$$

Сопротивление нагрузки:

$$Z_{нагр} = \frac{400000B/\sqrt{3}}{664A} = 348 \text{ Ом}.$$

Для определения $R_{нагр.\ доп}$ необходимо половину сопротивления нагрузки (максимальный ток перегрузки равен $2 \cdot I_{ном}$) умножить на коэффициент запаса, равный 30 %:

$R_{нагр.доп\,(вторичн)} = 0{,}3 \cdot \frac{348}{2} \cdot 0{,}7 = 36{,}5$ Ом;

выбираем 35 Ом.

Угол φ_A для линий СВН принимается равным 40°, а уставку R_{FD} выбираем следующим образом:

$R_{FD} = 2 \cdot R_{нагр.доп(вторичн)} = 70$ Ом. При этом достигается как учёт реактивной нагрузки, так и надежность срабатывания при удалённых коротких замыканиях.

На практике применяется следующий, хорошо зарекомендовавший себя метод определения значений φ_A и R_{FD}.

Определяется соотношение передаваемых активных и реактивных мощностей. Затем по этим значениям определяются соответствующие значения R и X, обозначаемые на комплексной плоскости:

$$R = \frac{U_{ном}^2 \cdot P}{P^2 + Q^2} \text{ и } X = \frac{U_{ном}^2 \cdot Q}{P^2 + Q^2}. \qquad (6.2)$$

Затем строится новая характеристика срабатывания ПО с учётом необходимого запаса в 20—30 %.

Следующим шагом является проверка чувствительности по расчётным значениям токов КЗ. Необходимым условием является учёт тока нагрузки, т. к. ток в месте установки реле возрастает при наложении тока нагрузки на ток короткого замыкания, в результате чего сопротив-

ление в точке замыкания сдвигается в направлении R. Для удобства расчётов используется специальная программа расчёта токов нагрузки/токов КЗ. По токам и напряжениям в месте установки реле может быть рассчитано соответствующее полное сопротивление. Расчёты необходимо производить по выражениям, приведённым в п.п. 3.2.3 (см. примеры в главе 7).

Уставки измерительной системы «фаза—земля»

Измерительные системы «фаза—земля» реле 7SA могут иметь независимые уставки в направлении R. При больших переходных сопротивлениях замыканий на землю (плохое заземление опор) это позволяет получить более высокую чувствительность. Использование этой измерительной системы возможно только в сетях с заземлённой нейтралью.

Возможно использование уставки, которая на диаграмме сопротивлений находится внутри области нагрузки, так как измерительная система «фаза—земля» может функционировать только при превышении током I_E или напряжением U_E соответствующих уставок ($I_E >$ и $U_E >$). Для того, чтобы избежать ложного срабатывания и отключения в случае возникшей несимметрии в системе, например, в цикле АПВ при внешних однофазных замыканиях, эти уставки должны быть достаточно высоки.

Дополнительно необходимо заметить, что уставка коэффициента компенсации (тока нулевой последовательности) k_E также влияет на зону действия пускового органа.

Коэффициент $K_{XE} = x_E/x_L$ влияет на область действия в направлении X. Обычно, он соответствует линии, на которой установлена защита. Значения сопротивлений, измеряемые системами «фаза- земля» и «фаза—фаза», оказываются одинаковыми (см. п.п. 3.2.2). Если смежные линии имеют тот же коэффициент x_E/x_L, то область действия пускового органа для междуфазных замыканий и замыканий на землю останется одинаковой. С другой стороны появятся и отличия. В примере расчёта 7.2 это рассмотрено более подробно.

Уставка $K_{RE} = R_E/R_L$ влияет на область действия в направлении R, что подробно рассмотрено в п.п. 3.5.1. В случае замыкания на линии с односторонним питанием ($I_ф = I_E$) сопротивление замыкания действительно только для измерений с коэффициентом $1/(1+ R_E/R_L)$ в соответствии с уставкой R_E/R_L. Действительное значение R_E/R_L в значительной мере зависит от сечения проводов и заземляющего проводника и может достигать 3 (см. п.п. 3.2.1, табл. 3.4).

Если в этом случае уставки реле адаптируются к линии, то величина сопротивления повреждения должна быть уменьшена в 4 раза.

Для упрощения на воздушных линиях отношение R_E/R_L можно принять равным 1 и допустить, что активное сопротивление замыкания при проведении измерений уменьшается в 2 раза.

В любом случае, не рекомендуется уставка $K_{RE} >$ 2-х, особенно при большой R уставке, так как это может привести к излишним срабатываниям при возникновении внешних замыканий и наложении нагрузки.

Расчёт уставки ПО для междуфазных замыканий, представленный выше, должен быть дополнен расчетом и для замыканий на землю. При этом необходимо использовать соответствующее выражение для контура «фаза—земля» (см. п.п. 3.2.3.).

Пример расчета приведен в п.п. 7.1

6.3. Уставки ступеней дистанционной защиты

6.3.1. Зона защиты (X-уставка) и ступени выдержки времени

Уставки задаются в соответствии с предварительно рассчитанной диаграммой ступеней. Основные правила выбора были рассмотрены в п.п. 3.1.14.

Первая ступень (с неполным охватом).

На одноцепных воздушных линиях уставка первой ступени обычно соответствует 85—90 % длины линии, и поэтому не требуется рассмотрения никаких дополнительных условий. Исключение составляют только длинные линии СВН, т. к. в этом случае, при большом активном сопротивлении замыкания, протекание тока нагрузки может вызвать увеличение защищаемой зоны (излишний охват) (см. п.п. 3.5.1). Поэтому может потребоваться уменьшение уставки до 75 % от длины линии или ниже.

Этого можно избежать, если использовать четырехугольную характеристику с наклоном верхней стороны, соответствующим углу α (7SA522, 7SA6).

В качестве типичного примера (рис. 6.6) можно рассмотреть влияние нагрузочного режима, предшествующего режиму КЗ, на дистанционные измерения на линии длиной 300км и напряжением 400 кВ. Предполагается, что КЗ возникло на удаленных шинах В (100% длины линии), и ток

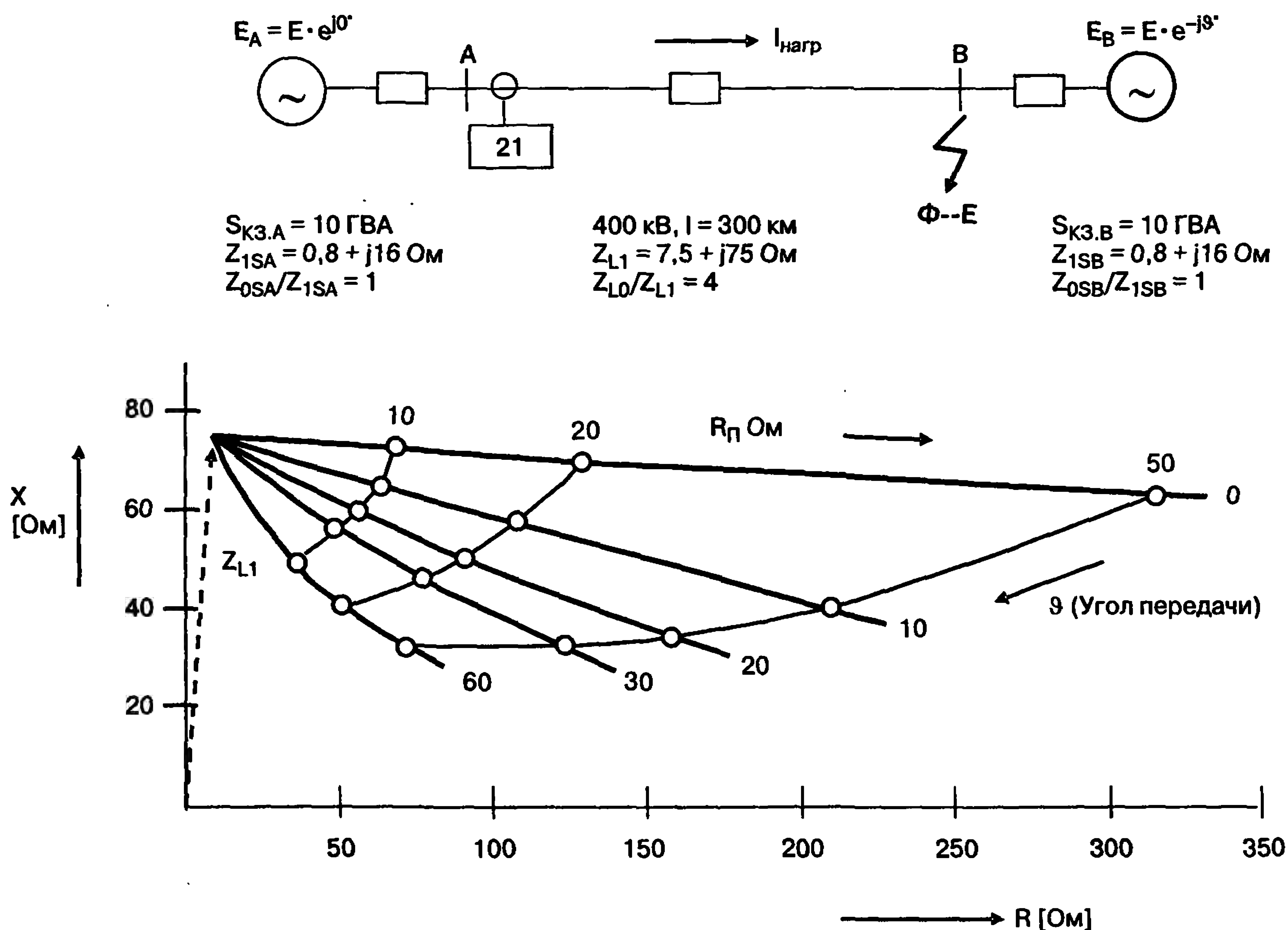


Рис. 6.6. Влияние нагрузки на дистационные измерения (пример)

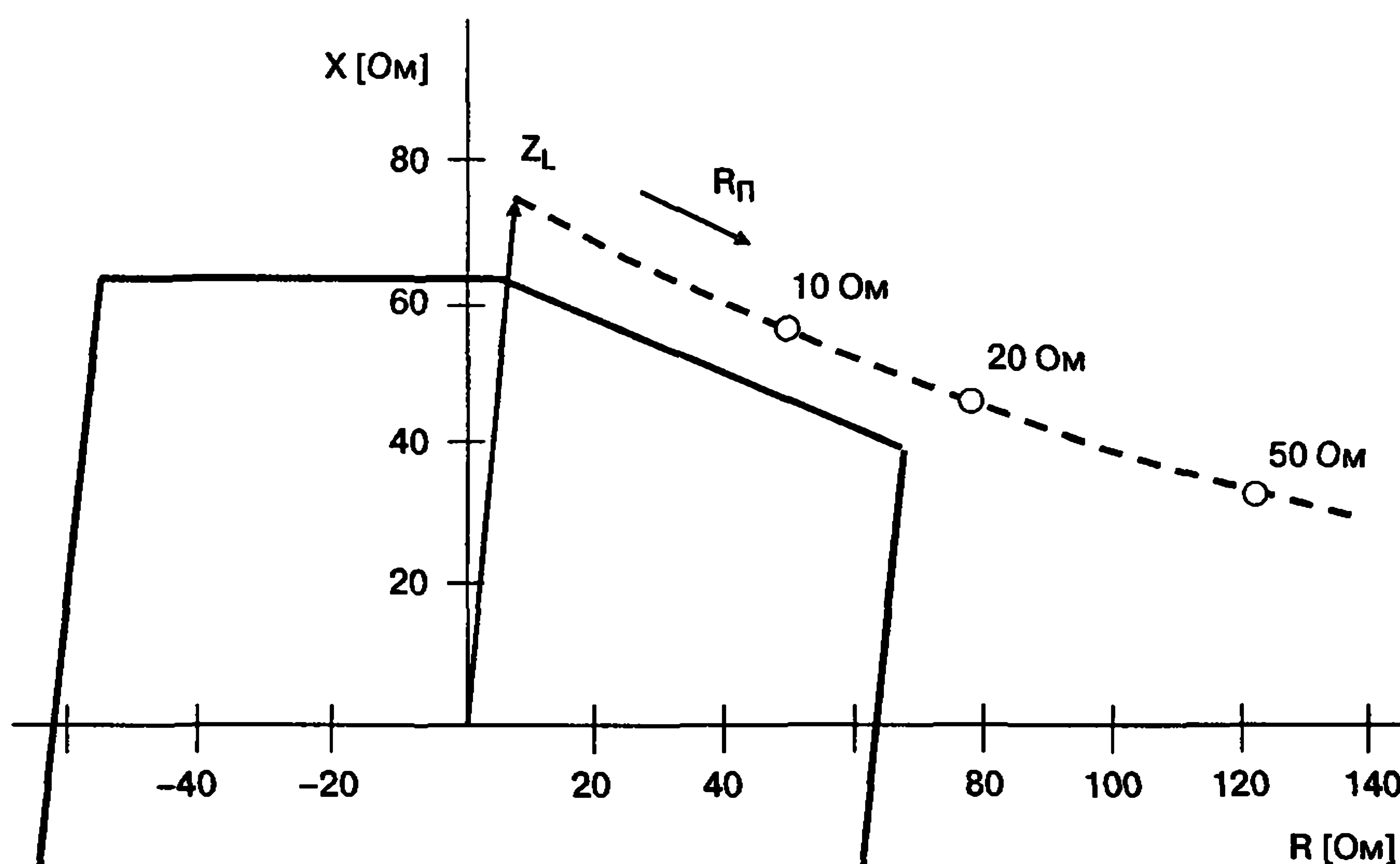


Рис. 6.7. Определение наклона верхней стороны характеристики I ступени для предотвращения излишних срабатываний при внешних КЗ под влиянием нагрузки. Уставки соответствуют параметрам системы, представленной на рис. 6.6: $\vartheta = 30°$; $Z_1 = 85\% Z_{L1}$; $R/X = 1$; угол наклона $\alpha = 22°$

нагрузки направлен от шин А к шинам В. Именно такая ситуация является критической, и ступень должна быть отстроена от этого режима.

Измеряемое сопротивление зависит от сопротивления замыкания и угла передачи (угол между ЭДС источников).

Для максимального угла передачи, равного 30°, необходимо наклонить верхнюю грань характеристики срабатывания на 22° (рис. 6.7).

В общем случае схема замещения системы может быть приведена к простейшему виду: линии с двусторонним питанием, как это представлено на рис. 6.6. Используется при расчете уставок на длинных линиях, где эффект наклона имеет большое значение.

Формула для оценки наклона ступени для этого случая приведена в Приложении П.3.

Однако для более подробного изучения могут быть использованы компьютерные программы анализа.

В некоторых защитах есть функция автоматического изменения наклона характеристики на основе метода, рассмотренного в п.п. 3.5.1, рис. 3.101 (Примером является реле 7SA513).

Необходимо отметить, что:

зона действия в направлении действительной оси R сокращается из-за влияния удалённого источника питания,

срабатывание при коротких замыканиях со значениями активного сопротивления более 20 Ом может быть обеспечено с трудом, даже если значение уставки R велико (для таких длинных линий отношение R/X обычно равно 0,5).

Для защиты от замыканий на землю с более высокими значениями активного сопротивления должна быть предусмотрена отдельная защита от замыканий на землю.

В параграфах 7.1 и 7.2 приведены примеры расчёта для двухцепных воздушных линий и Т-образных линий.

Для линий с последовательной компенсацией значение (X_L-X_C) должно при-

ниматься за расчётное при выборе уставки. Также может быть учено ёмкостное сопротивление конденсатора в начале смежной линии. Кроме того, должен быть учтён дополнительный запас для компенсации влияния субгармонических колебаний (см. п.п. 3.5.6, выражение 3.170). В итоге это приводит к очень короткой зоне действия первой ступени, которая срабатывает только при близких КЗ.

Резервные ступени

Выбор уставок 2 и 3 ступеней осложняется тем, что их область действия зависит от режима работы системы.

Только в случае радиальных и кольцевых линий без промежуточных источников питания условия расчёта являются однозначными и ступени дистанционной защиты могут быть рассчитаны с постоянными коэффициентами отстройки относительно ступени защиты смежной линии (например, 0,9).

В разветвлённых сетях уставки резервных ступеней могут быть рассчитаны только для определенной конфигурации сети. При изменении режима возможно увеличение выдержки времени или неселективное отключение.

Возможно использование следующих альтернативных путей расчёта.

Первый вариант расчета ступеней (абсолютная селективность предпочтительнее времени отключения)

Промежуточные источники питания не учитываются. При наличии параллельных цепей учитывается соответствующее уменьшение сопротивления.

В этом случае получаем ступени со 100 % селективностью для всех режимов работы системы. Однако зоны действия ступеней могут стать очень короткими и поэтому вероятны частые отключения замыканий резервной защитой, для выполнения которой предусмаривается так называемая «финальная» ступень. Селективность действия последней ступени требуется для того, чтобы ограничить неконтролируемые отключения. Этот вариант выбора уставок можно использовать, если допустимы отключения замыканий с большой выдержкой времени (устойчивая, сильно разветвлённая распеределительная система).

Второй вариант расчета ступеней (маленькие выдержки времени с ограниченной селективностью)

Промежуточные источники питания учитываются. Параллельные линии не учитываются. Зона действия второй ступени охватывает половину наиболее короткой смежной лини. Зона действия третьей ступени охватывает всю длину самой длинной смежной линии (как и в примере расчёта уставки пускового органа).

При этом зоны действия ступеней становятся больше и все короткие замыкания определяются, по крайней мере, последней 3-ей ступенью. Однако при изменении режима работы системы возможны дополнительные отключения. Специальная «финальная» ступень не требуется, т. к. «финальные» ступени всех защит имеют одинаковые выдержки времени (за пределами Европы дистанционные защиты обычно имеют только 3 ступени; резервная защита с «финальной» направленной/ненаправленной ступенью обычно не используется).

Этот способ выбора уставок рекомендуется использовать, если при отключении КЗ со временем, превышающим — выдержку времени второй ступени t_2, система становится неустойчивой и в любом случае распадётся (сети ВН и СВН с возможным нарушением устойчивости).

Третий вариант расчета ступеней (выбор ступеней в зависимости от конкретной сети)

В большинстве случаев для расчета ступеней используется нечто среднее между первым и вторым вариантами. В этом случае, например, предполагается, что на станции с четырьмя генераторами, как минимум, два будут находиться в работе, а при наличии трёх параллельных линий только одна из них может быть отключена. В соответствии с выбранными условиями рассчитываются уставки.

Предложения по выбору уставок с учетом со среднестатистических условий работы не были поддержаны. Основными критериями для определения диаграммы распределения ступеней должны быть: надёжность электроснабжения ответственных потребителей (больницы, промышленные предприятия) и устойчивость работы питающей системы.

6.3.2. Компенсация влияния сопротивления дуги (R-уставка)

При выборе уставок ступеней дистанционной защиты в направлении R необходимо учитывать активное сопротивление линии/кабеля, а также переходное сопротивление в месте КЗ. При этом следует обратить внимание на увеличение активного сопротивления из-за подпитки с удалённого конца (см. 3.5.1). При выборе уставок резервных защит также необходимо учитывать, что при удалённых замыканиях в токе реле присутствует ток нагрузки, который уменьшает значение угла сопротивления при КЗ, измеряемого реле, что было отмечено при выборе сопротивления уставки ПО.

Уставки по активному сопротивлению ступени с неполным охватом защищаемой зоны (R1 и R1E)

Междуфазная измерительная система

Междуфазные замыкания на воздушных линиях возникают из-за раскачивания проводов или из-за перекрытия фаз электрически проводящими предметами (ветви, провода, летательные аппараты).

При раскачивании два фазных проводника (либо один фазный и один заземляющий) перехлёстываются. Перекрытие происходит в тот момент, когда расстояние между проводниками становится достаточно малым для пробоя воздушного промежутка. При частоте 50 (60) Гц оно определяется соотношением:

$$l = \frac{U_{\text{ном(ф-ф)}}}{300\text{кВ/м}}\,[\text{м}].$$

Для быстродействующих ступеней дистанционных защит это расстояние соответствует эффективной длине дуги (примерно 1,3 м при напряжении 380 кВ).

Если перекрытие вызвано попаданием на линию проводящего предмета, длина дуги принимается равной расстоянию между проводниками. Это наиболее тяжелый случай и поэтому он является расчётным.

Соответствующее сопротивление дуги может быть рассчитано по следующему выражению (см. 3.5.1):

$$R_{\text{дуги}} = \frac{2500[\text{В}] \cdot l_{\text{дуги}}[\text{м}]}{I_{\text{КЗ-min}}[\text{А}]}\ \text{Ом},$$

где $I_{\text{КЗ-min}}$ — минимальный ток, протекающий от места установки защиты до точки короткого замыкания [А].

Усредненные значения сопротивлений дуги, полученные для различных классов напряжений, даны в табл. 6.1.

Необходимо учитывать, что при дистанционных измерениях активное сопротивление, возникающее в месте КЗ при междуфазных замыканиях, уменьшается в 2 раза (см. 3.5.1).

Таблица 6.1

Типовые значения сопротивления дуги на воздушных линиях

Класс напряжения	Среднее расстояние между проводниками, м	Сопротивление дуги, Ом	
		при $I_{кз}$ = = 1000А	при $I_{кз}$ = = 10 000А
380 кВ	11	27,5	2,75
220 кВ	7	17,5	1,75
110 кВ	3,5	7,5	0,75
20 кВ	< 1	< 2,5	< 0,25

Если рассчитанное сопротивление дуги полностью учтено при выборе уставки, то обеспечивается 100 % запас. Такой большой запас для междуфазных замыканий с переходным сопротивлением дуги допустим, поскольку итоговые значения сопротивлений могут быть легко заданы даже на коротких линиях. Запас относительно сопротивления нагрузки всегда достаточно велик.

Пример 6.1.

Выбор уставки по оси R первой ступени защиты для междуфазных замыканий

Дано:

Воздушная линия 110кВ, l = 10км,
R_L' = 0,07 Ом/км, X_L' = 0,38 Ом/км.

$I_{кз\text{-}min\,(ф—ф)}$ = 1,2 кА.

Максимальный ток нагрузки $I_{нагр\text{-}max}$ = = 530 А.

Решение.

Сопротивление дуги:

$$R_{дуги} = \frac{2500 \cdot 3{,}5}{1200} = 7{,}3 \text{ Ом}.$$

Уставка, соответствующая первичным величинам:

$$R1 = R_L' + R_{дуги} = 0{,}07 \cdot 10 + 7{,}3 = 8{,}0 \text{ Ом}.$$

Соответствующая уставка первой ступени по X:

$$X1 = 0{,}9X_L = 0{,}9 \cdot 10 \cdot 0{,}38 = 3{,}4 \text{ Ом}.$$

Отношение R/X для данной ступени: 8,0/3,4 = 2,35.

При выборе R-уставки необходимо предотвратить возможность ложного срабатывания в нагрузочном режиме.

Минимальное сопротивление нагрузки:

$$Z_{нагр\text{-}min} = \frac{U_{ном}/\sqrt{3}}{I_{нагр.max}} = \frac{110000/\sqrt{3}}{530} = 120 \text{ Ом}.$$

Если предположить увеличение тока нагрузки в 2 раза, а также учесть запас в 30 %, получим следующее максимально допустимое значение R-уставки:

$$R1_{max} = 0{,}7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 120 = 42 \text{ Ом}.$$

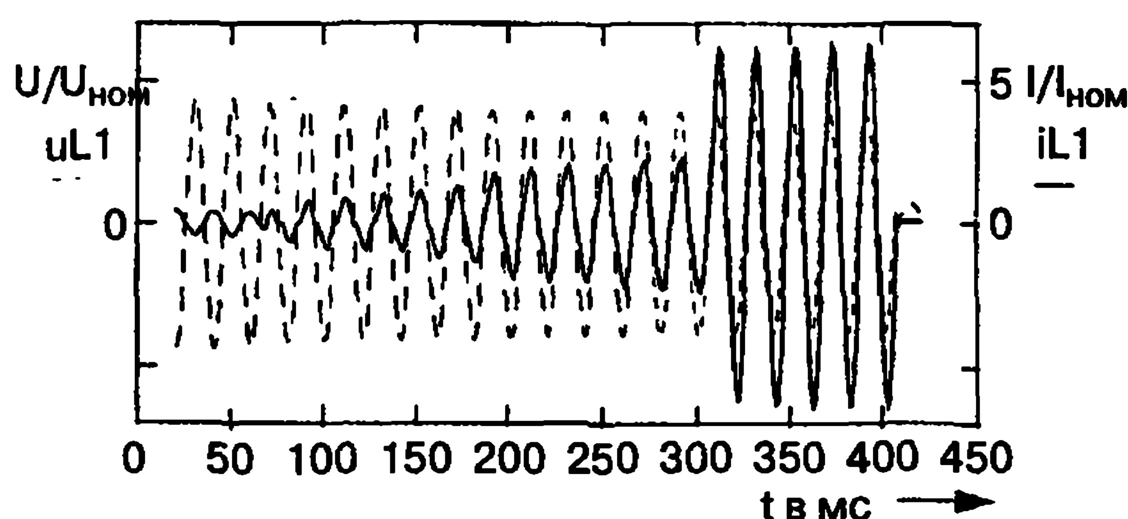
Необходимо выбрать среднее значение между максимально допустимым значением 42 Ом и необходимым значением 8 Ом. С запасом в 50 % выбираем значение 12 Ом. Это соответствует отношению R/X = 3,5.

Измерительная система фаза—земля.

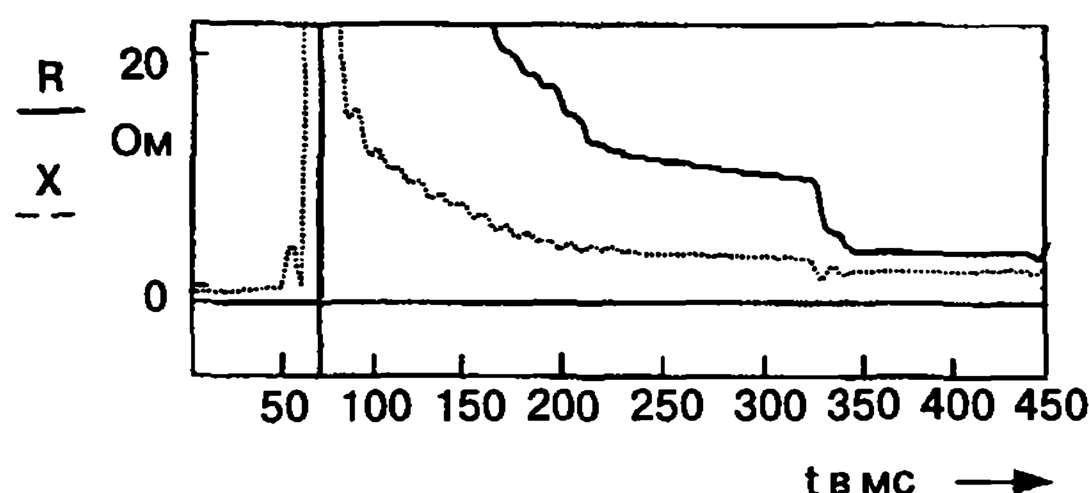
Замыкания на землю обычно возникают в результате перекрытий гирлянд изоляторов. Помимо соответствующего сопротивления дуги необходимо учитывать сопротивление заземления опоры. Последнее значительно уменьшается при наличии заземляющего проводника (см. 3.5.1).

При возникновении перекрытий по деревьям в средней части пролёта в первый момент замыкания переходное сопротивление может достигать нескольких сотен Ом, однако это сопротивление быстро уменьшается (рис. 6.8).

Первая ступень (R_E –уставка) в любом случае должна надёжно определять замыка-



а) осциллограмма тока и напряжения в поврежденной фазе



б) осциллограмма измеряемых при повреждении активных и реактивных сопротивлений

Рис. 6.8. Линия 110 кВ, перекрытие по дереву

ние на землю, возникающее в результате перекрытия изоляторов. Определение замыканий на землю дистанционной защитой возможно только при сопротивлении замыкания до нескольких десятков Ом из-за перекрытия областей срабатывания защиты и нагрузки.

При постоянном значении активного переходного сопротивления ситуация осложняется, так как это сопротивление увеличивается из-за наличия источника питания на противоположном конце.

Для защиты от замыканий на землю с большим переходным сопротивлением, от 100 Ом и выше, необходимо использование отдельной защиты от замыканий на землю.

Для выбора уставки можно использовать следующее выражение:

$$R_{1(\text{пер})} \geqslant 1{,}2\left(\frac{R_\text{п} + R_\text{дуги} + \frac{I_{\text{ф}2}}{I_{\text{ф}1}}R_\text{п}}{1 + \frac{R_E}{R_L}\frac{I_{E1}}{I_{\text{ф}1}}} + R_L\right), \quad (6.3)$$

где R_L — *сопротивление линии;*

$R_\text{дуги}$ — сопротивление дуги;

$R_\text{п}$ — переходное сопротивление в месте замыкания на землю;

$I_{\text{ф}1}$ — фазный ток короткого замыкания в месте установки реле при однофазном замыкании;

$I_{\text{ф}2}$ — фазный ток короткого замыкания с противоположного конца при однофазном замыкании;

$\frac{R_E}{R_L}$ — коэффициент компенсации токов замыкания на землю (активная составляющая);

$\frac{I_{E1}}{I_{\text{ф}1}}$ — отношение тока в земле к фазному току в месте установки реле.

Коэффициент 1,2 соответствует запасу в 20 %.

В разветвлённых системах с равномерным заземлением нейтральных точек отношение $\frac{I_{E1}}{I_{\text{ф}1}}$ обычно близко к 1. В крайнем случае отношение $\frac{I_{E1}}{I_{\text{ф}1}}$ может быть равно нулю, если со стороны питания нет источников тока в земле (см. п.п. 3.1.6, рис. 3.15).

Пример 6.2.

Выбор RE-уставки первой ступени защиты от замыканий фазы на землю.

Дано:

воздушная линия 110кВ без грозозащитных тросов, l = 10км,

R'_L = 0,07 Ом/км, X'_L = 0,38 Ом/км,

$R'_{LE}/R'_{L1} = 0{,}7$, длина гирлянды изоляторов $l = 1{,}3$ м.

$I_{\text{КЗmin (однофазн)}} = 0{,}9$ кА.

$\frac{I_{\Phi 2}}{I_{\Phi 1}} = 3$ при замыкании на землю на границе области срабатывания

и $I_E \approx I_\Phi$ в месте установки реле;

сопротивление заземления опоры $R_{\text{опоры}} = 5$ Ом.

Условия нагрузки такие же, как и в предыдущем примере.

Решение.

$$R_{1(\text{перв})} = 1{,}2 \times$$

$$\times \left(0{,}07 \cdot 30 + \frac{\frac{2500(1{,}5 \cdot 1{,}3)}{900} + 5 + 3 \cdot 5}{1 + 0{,}7 \cdot 1}\right) =$$

$$= 17{,}1 \text{ Ом}.$$

Для учёта формы дуги длина гирлянды изоляторов увеличена в 1,5 раза.

Отношение R/X в этом случае равно $17{,}1/3{,}4 = 5{,}0$.

На этом примере хорошо видно, как сильно увеличивается сопротивление уставки R при учёте источника питания на противоположном конце в случае замыкания на землю через активное переходное сопротивление. Увеличение R влечет за собой увеличение отношения R/X ступени. Для того, чтобы избежать излишнего охвата защищаемой зоны из-за угловой погрешности ТТ, уставка X должна быть уменьшена (см.6.3.4).

Уставка по активному сопротивлению R для ступени с полным охватом Z1B (зонное расширение)

Ступень Z1B является управляемой ступенью.

Расчёт должен производиться также, как и для ступени с неполным охватом. Однако расчетным для определения требуемой уставки R при учёте подпитки с противоположного конца должно быть замыкание в конце линии.

Уставки по R для резервных ступеней дистанционной защиты

Здесь используются те же принципы, что и для первой ступени.

При определении сопротивления дуги необходимо учитывать увеличение длины дуги из-за электродинамических усилий, ветра и т.д. Расчеты следует производить по выражению (3.96), приведённому в п.п. 3.5.1.

Как правило, необходимо увеличение уставки по оси R, полученной для ступени с неполным охватом, пропорционально уставке по оси X рассматриваемой резервной ступени, так как наличие промежуточной подпитки также вызывает увеличение переходного сопротивления в точке замыкания.

Если отношение R/X в первой ступени уже больше 1, то пропорционально рассчитанная уставка по R для второй ступени, а особенно для 3-ей ступени, может попасть

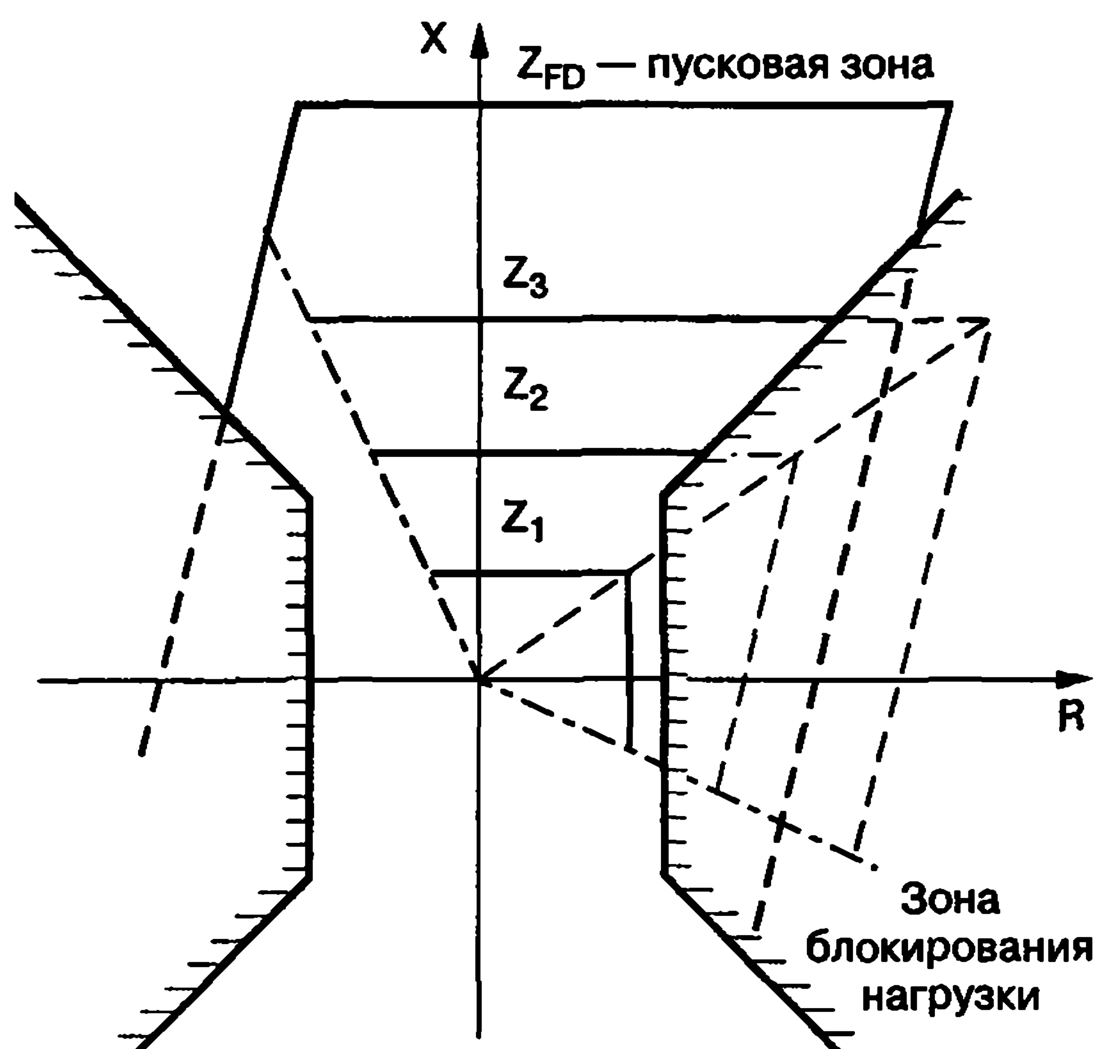


Рис. 6.9. Ограничение области срабатывания с помощью зоны блокирования нагрузки

в область нагрузки. В связи с тем, что используется пуск по сопротивлению, эти ступени автоматически ограничены пусковыми характеристиками (рис. 6.9). Поэтому другой адаптации не требуется. При использовании пуска по току или комбинированного пуска возможно получение большей области действия. В этом случае отношение R/X для системы измерений «фаза—фаза» следует уменьшить, так как высокой чувствительности не требуется. Для системы измерений «фаза—земля» уставка по R должна быть достаточно велика для обеспечения надёжного определения замыканий.

6.3.3. Особенности определения уставок защиты в кабельных сетях

Угол сопротивления прямой последовательности на кабельных линиях значительно меньше, чем на воздушных линиях при одном и том же классе напряжения. В частности, для кабелей среднего класса напряжения отношение R/X больше 1. Соответствующий угол сопротивления цепи короткого замыкания не превышает 30°.

В кабельных сетях фазные углы сопротивлений прямой и нулевой последовательности значительно отличаются (см. табл. 3.4 п.п. 3.2.1). Коэффициенты компенсации токов замыкания на землю $K_{XE} = X_E/X_L$ и $K_{RE} = R_E/R_L$ в дистанционных реле должны соответствовать параметрам кабеля для получения правильных результатов измерений при возникновении замыканий на землю (см. результаты анализа в п.п. 3.5.1).

В городских сетях возможно влияние металлических рельсов и труб, проходящих параллельно кабелям, на сопротивление нулевой последовательности. Точное определение сопротивления нулевой последовательности возможно только путем измерений непосредственно на местности. Область действия ступени с неполным охватом может быть равна 90 % от длины кабеля только при учёте реального сопротивления нулевой последовательности. Поэтому, если нейтраль системы заземлена и замыкания фазы на землю должны определяться при помощи нормального коэффициента отстройки, то такие измерения рекомендуются. Если для выбора уставки используются только расчётные значения, то должна быть выбрана уставка 80—85 %.

Компенсация дуги на кабелях

При пробое изоляции кабеля возникает дуга, напряжение на которой достаточно высоко из-за давления газа. (см. табл. 6.2):

Таблица 6.2

Сопротивления дуги на кабелях

Номинальное напряжение кабеля, кВ	Напряжение дуги, кВ	Сопротивление дуги при токе КЗ 1кА, Ом
6—20	0,4	0,5
110	1,5	1,5
380	2,5	2,5

Компенсация сопротивления дуги требует относительно большого значения отношения R/X при выборе уставок защиты на коротких кабелях.

Пример.

Кабель 110 кВ под атмосферным давлением, 240 мм^2 Cu, l = 3 км.

Данные кабеля указаны в табл. 3.4 п.п. 3.2.1, нейтраль системы заземлена.

Минимальный фазный ток короткого замыкания — 2,5 кА.

Минимальный ток при КЗ на землю — 0,5 кА.

Необходимо определить уставку первой ступени.

Решение.

Предполагается, что сопротивление нулевой последовательности кабеля было определено из опыта на местности, поэтому коэффициент отстройки принят равным 90 %.

$X1 = K_{отс1} l X'_{L1} = 0{,}9 \cdot 3{,}0 \cdot 0{,}14 = 0{,}378$ Ом;

$$R1 = lR'_{L1} + \frac{U_{дуги}}{I_{К3min}} = 3{,}0 \cdot 0{,}09 + \frac{1{,}5кВ}{2{,}5кА} =$$
$= 0{,}87$ Ом.

Это соответствует отношению $R/X = 2{,}3$. Опять используется запас 100 % для сопротивления дуги, так как только половина его проявляется в измерениях.

Область действия измерительной системы фаза—земля в направлении R определяется выражением (6.3).

Из (6.3)

$$RE1 = 1{,}2 \times$$
$$\times \left(l \cdot R'_{L1} + R_{дуги} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_E}{R_L} \cdot \frac{I_{E1}}{I_{ф1}}} \right) = 1{,}2 \times$$
$$\times \left(3{,}0 \cdot 0{,}09 + \frac{1{,}5кВ}{0{,}5кА} \cdot \frac{1}{1 + 1{,}11 \cdot 1} \right) = 2{,}0 \text{ Ом}.$$

Отношение R/X в этом случае равно 5,4.

При небольших значениях сопротивлений нагрузку можно не учитывать и принять $R1 = RE1 = 2{,}0$ Ом.

При выборе уставки компенсации дуги для резервных ступеней необходимо учитывать возможность перекрытий на концах кабелей или на шинах. А также необходимо учитывать замыкания на последующих воздушных линиях, если они есть. Расчёт производится также, как и в вышеприведенном примере.

Для расчета пускового органа защиты на кабельных линиях используются те же правила, что на воздушных линиях. Из-за малого сопротивления кабеля пуск упрощается. В большинстве случаев достаточно пуска по току, т. к. ток короткого замыкания в несколько раз больше тока нагрузки. Комбинированный пуск при замыканиях на землю применяется только, если ток в земле ограничен.

При использовании пуска по сопротивлению уставки по оси X могут быть относительно небольшими, если в зону пускового органа входит только сопротивление смежной кабельной секции. Использование больших уставок имеет смысл только для улучшения резервной защиты и увеличения компенсации дуги. Запас относительно сопротивления нагрузки обеспечивается. В этом случае обычно устанавливаются следующие значения вторичных уставок:

$X_{+FD} = 40$ Ом, $X_{-FD} = 20$ Ом и $R_{FD} = R_{FDE} = 20$ Ом в предположении, что токи ТТ приблизительно соответствуют максимальному длительно допустимому току нагрузки кабеля. Если на промышленных предприятиях возможны большие пусковые токи, то может потребоваться уменьшение уставки X_{+FD} до значения:

$$X_{+FD} \leqslant \frac{U_{ном}/\sqrt{3}}{\sum I_{пуск\,max}} \sin\varphi_{пуск} \frac{k_I}{k_U}.$$

Если пусковые токи в 5—6 раз превышают номинальный ток двигателя, но соответствуют номинальным токам источника питания, вычисленные значения могут оказаться значительно меньше.

6.3.4. Регулировка зоны защиты в случае больших значений *R/X*-уставок

Угловые погрешности ТН (δ_U) и ТТ (δ_I) вызывают поворот вектора сопротивления короткого замыкания в направлении

оси R. В результате этого появляется отрицательная погрешность (излишний охват) при измерении X. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем меньше угол сопротивления КЗ. Это означает, что он появляется, когда сечение кабеля мало ($\varphi_{КЗ} < 30°$), а также, если переходное сопротивление в точке замыкания велико по сравнению с реактивным сопротивлением линии.

При большом значении отношения R/X верхняя сторона четырехугольника должна иметь наклон, равный $\alpha = \delta_U + \delta_I$, что возможно при использовании реле 7SA6 или 7SA52.

В старых версиях реле, где отсутсвует возможность установки наклона, если уставка R/X велика, рекомендуется несколько уменьшить область действия ступени с неполным охватом в направлении оси X. Коэффициент отстройки можно принять равным 90 % только при $R/X \leqslant 1$. При больших уставках R/X коэффициент отстройки может быть рассчитан по формуле:

$$K_{отс} \leqslant \left[1 - \frac{R}{X} \cdot \mathrm{tg}(\delta_U + \delta_I)\right] 93{,}5\ \%.$$

Типичные значения уставок R/X для компенсации дуги представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Типичные уставки R/X для многоугольных характеристик

Воздушная линия/кабель	Отношение R/X уставки ступени
короткие кабели (0,5—3 км)	3—5
длинные кабели > 3 км	2—3
короткие воздушные линии < 10 км	2—5
Воздушные линии < 100 км	1—2
длинные воздушные линии 100—200 км	0,5—1
длинные линии СВН > 200 км	≤0,5

Угловые погрешности ТТ и ТН не выше 1°, если используются трансформаторы напряжения класса 1 и трансформаторы тока класса 5Р. Это особенно важно, если ТТ и ТН недогружены, что соответствует реальным условиям из-за малого потребления цифровых реле.

Полная угловая погрешность остаётся ниже 2°. Она определяет угол наклона верхней стороны многоугольной характеристики. Для характеристики без наклона рассчитывается коэффициент отстройки по углу наклона:

$$K_{отс} \leqslant \left[1 - \frac{R}{X} \cdot \mathrm{tg}(2)\right] 93{,}5\ \% =$$

$$= \left[1 - \frac{R}{X} \cdot 0{,}035\right] 93{,}5\ \%.$$

$K_{отс} \leqslant 84$ %, для $R/X = 3$,

$K_{отс} \leqslant 77$ %, для$R/X = 5$.

При использовании ТТ с линеаризованными характеристиками (TPZ) необходимо учитывать возможное увеличение угловой погрешности до 3° в случае, если трансформатор полностью нагружен. Тогда в приведенной выше формуле значение ($\delta_U + \delta_I$) следует принять равным 4°. При сильной недогрузке угловая погрешность значительно уменьшается ($\delta = \frac{P_{вн} + P_{нагр}}{P_{вн} + P_{ном}} \delta_{ном}$).

Если при КЗ на кабеле $\varphi_{КЗ} < 20°$, то целесообразно использовать круговую характеристику срабатывания. Это оправданно, поскольку значение сопротивления дуги в

кабельных сетях невелико. В реле 7SA6 для этой цели предусмотрены простая и модифицированная характеристики.

6.3.5. Ступени защиты с круговыми и многоугольными характеристиками срабатывания

В настоящее время используются устройства различных производителей и поколений. Поэтому часто возникает необходимость согласования дистанционных ступеней с различными характеристиками срабатывания.

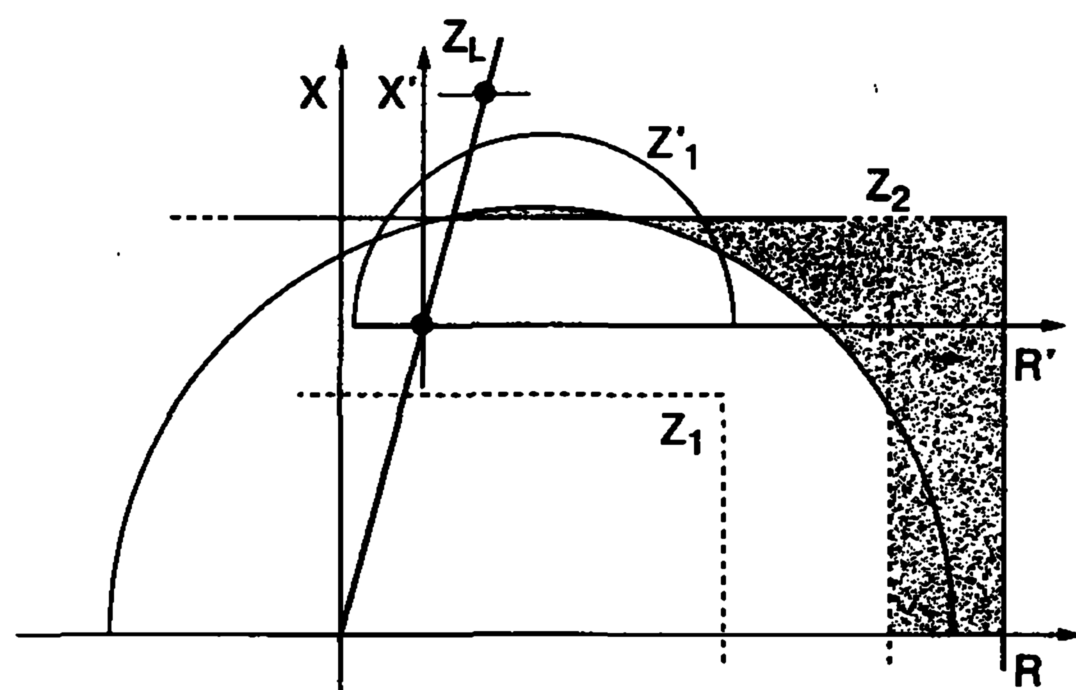
Типичным примером является использование последовательно включенных защит с круговыми (механические реле) и многоугольными (цифровые реле) характеристиками срабатывания (рис. 6.10).

В этом случае для согласования ступеней необходимо использовать координату *X* точки пересечения характеристики срабатывания и прямой, соответствующей сопротивлению линии (см. 3.1.7, рис. 3.24).

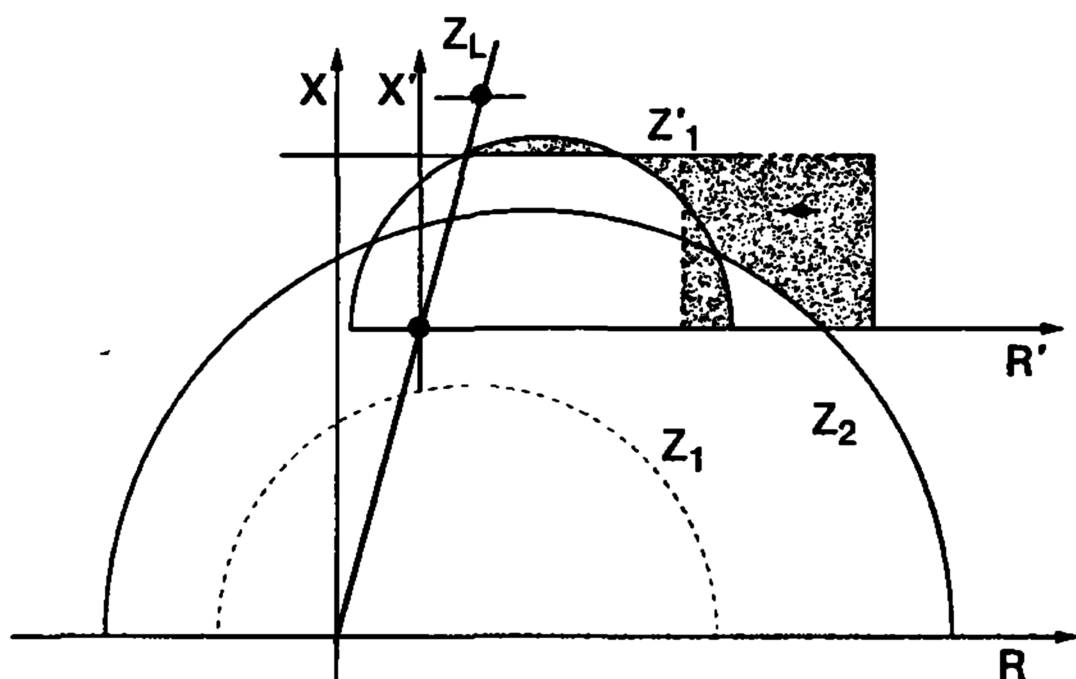
При учёте компенсации дуги, естественно, возникают большие отклонения. Однако, чем больше область действия цифровых реле в направлении оси R, тем лучше. При использовании четырехугольных характеристик срабатывания возможно определение замыканий с большим активным переходным сопротивлением и маленьким реактивным, тогда как круговые характеристики позволяют получить достаточную область действия в направлении оси R только для резервных ступеней. Неселективного отключения не происходит.

Совершенно особая ситуация возникает, если реле с различными характеристиками используются для создания системы защиты с передачей разрешающего сигнала для ступени с полным охватом.

Если используется «эхо»-функция, то область действия пускового органа в обратном направлении должна быть больше, чем область действия отключающей ступени с полным охватом на противоположном конце линии для того, чтобы избежать излишнего «эхо-сигнала» при внешних КЗ. Пусковая характеристика должна полностью охватывать область действия ступени с полным охватом в третьем квадранте, куда попадают сопротивления при внешних коротких замыканиях. Тоже самое относится к схемам с блокирующим сигналом, однако в этом случае, для реле



а) Различие круговых и многоугольных характеристик срабатывание вторых ступеней



б) Различие круговых и многоугольных характеристик срабатывание первых ступеней

Рис. 6.10. Согласование защит с различными характеристиками срабатывания

производимых в Англо-Саксонских странах, вместо пускового органа должна быть рассмотрена обратно-направленная блокирующая ступень (рис. 6.11).

Если в схеме с передачей разрешающего сигнала для ступени с полным охватом используется направленный пуск, то взаимная координация характеристик должна быть проверена расчётом соответствующих коротких замыканий с учётом максимально возможного активного сопротивления замыкания. При расчёте точка короткого замыкания должна быть расположена в третьем квадранте на границе области действия ступени с излишним охватом.

6.3.6. Уставки блокировки при качаниях

Блокировка при качаниях реагирует на скорость изменения вектора качаний мощности. Вблизи области действия пускового

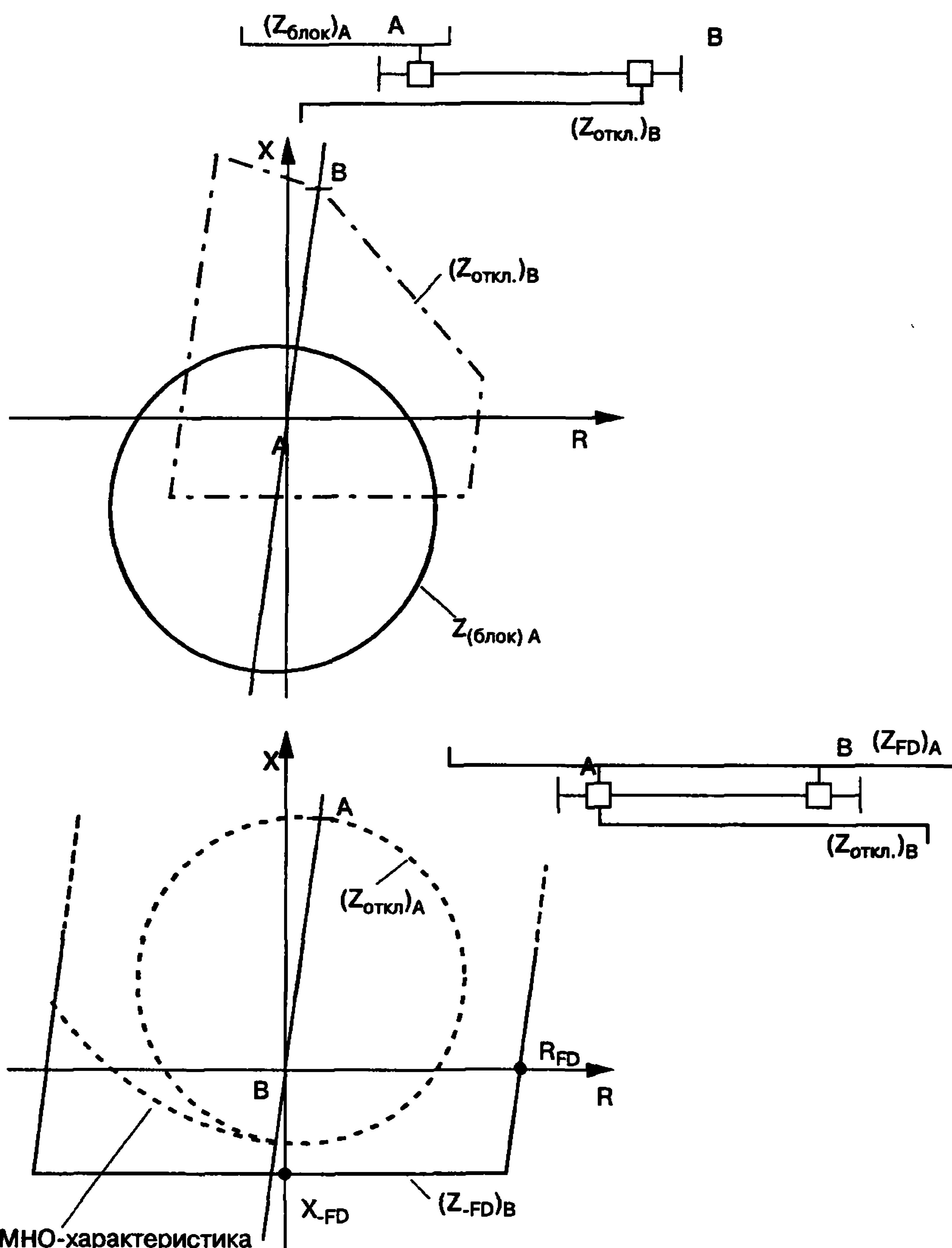


Рис. 6.11. Схема с блокирующими сигналами: согласование круговой характеристики с многоугольной

органа защиты преобладающее влияние оказывает резистивная составляющая dR/dt (см. п.п. 3.1.11, рис. 3.45). Это особенно характерно для систем сверхвысокого напряжения, где углы линий достигают 85°.

Для классической двухмашинной системы изменение dR/dt может быть определено следующим образом.

Полное сопротивление, измеренное в электрическом центре качаний при равенстве ЭДС систем

$$Z_ц = \frac{U_{ф\text{-}E}}{I_ф} = \frac{E\cdot\cos\frac{\vartheta}{2}}{\left(2\cdot E\cdot\sin\frac{\vartheta}{2}\right)/Z_\Sigma} =$$

$$= \frac{Z_\Sigma}{2}\operatorname{ctg}\frac{\vartheta}{2}, \qquad (6.4)$$

где $Z_\Sigma = Z_{S1} + Z_L + Z_{S2}$.

При качаниях векторы ЭДС источников расходятся. Для упрощения предполагается, что частота качаний постоянна и вектор ЭДС одного источника поворачивается относительно другого с постоянной угловой скоростью. Угол поворота $\vartheta = \omega_p t$. Угловая скорость $\omega_р$ определяет скорость, с которой изменяющаяся ЭДС вращается относительно зафиксированной.

Из выражения (6.4):

$$Z_ц = \frac{Z_\Sigma}{2}\operatorname{ctg}\left(\frac{\omega_р\cdot t}{2}\right). \qquad (6.5)$$

В цифровых реле 7SA изменение вектора качаний мощности оценивается отдельно для активной и реактивной составляющих сопротивления. Ниже рассматривается только R— составляющая, т. к. обычно именно этот критерий является определяющим в магистральных сетях.

$$R_р = \frac{X_\Sigma}{2}\operatorname{ctg}\left(\frac{\omega_р\cdot t}{2}\right). \qquad (6.6)$$

Дифференцируя, получаем скорость изменения вектора сопротивления при качаниях:

$$\frac{dR_р}{dt} = \frac{Z_\Sigma}{2}\frac{\omega_р}{2}\operatorname{tg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{\pi}{2}Z_\Sigma f_р\operatorname{tg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right)\ \text{Ом/с}. \qquad (6,7)$$

Эти данные используются в функции блокировки при качаниях для принятия решения.

Пример: традиционные уставки блокировки при качаниях.

При использовании традиционных реле и ранних версий цифровых реле (7SA511) производная dR/dt рассчитывалась как $\Delta R/\Delta t = (R1 - R2)/\Delta t$ для двух концентрических характеристик или ограничивающих линий и таймера (см. п.п. 3.1.11). В следующем примере рассматривается метод расчета уставки классической блокировки при качаниях.

Дано: сеть с номинальным напряжением 230 кВ, изображённая на рис. 3.44в, п.п. 3.1.11.

Длина линии 200км, $Z_L' = 0.3$ Ом/км.

Мощность трёхфазного КЗ с обоих концов линии равна 5 ГВА.

Максимальная частота качаний мощности, при которой статическая устойчивость не нарушается, $f_Р = 2$ Гц.

Трансформаторы тока: 800/1 А, трансформаторы напряжения: 230/0.1 кВ.

Рассчитать уставки блокировки при качаниях мощности.

Расчет.

Сопротивление линии: Z_L = 200км × × 0,3 Ом/км = 60 Ом.

Сопротивление систем: $Z_{S1} = Z_{S2} =$

$$= \frac{230^2\text{кВ}^2}{8000\text{МВА}} = 6{,}6\ \text{Ом}.$$

Тогда сумма сопротивлений Z_Σ = 6,6 + + 60 + 6,6 = 73,2 Ом.

Предполагается, что угол передачи в нормальном режиме работы не больше 60°. Из этого следует, что многоугольная характеристика реле, обнаруживающего качания (PPOL), т. е. пускового органа блокировки, должна иметь небольшой запас для того, чтобы избежать срабатывания блокировки в условиях устойчивой работы системы на нагрузку. В этом случае уставка пускового органа блокировки выбирается так, что вектор сопротивления при качаниях попадает внутрь многоугольника PPOL только, если угол передачи достигает 70°. (рис. 6.12).

Уставку по оси R многоугольной характеристики пускового органа блокировки получаем из выражения (6.4), причем здесь и далее рассчитываются первичные сопротивления:

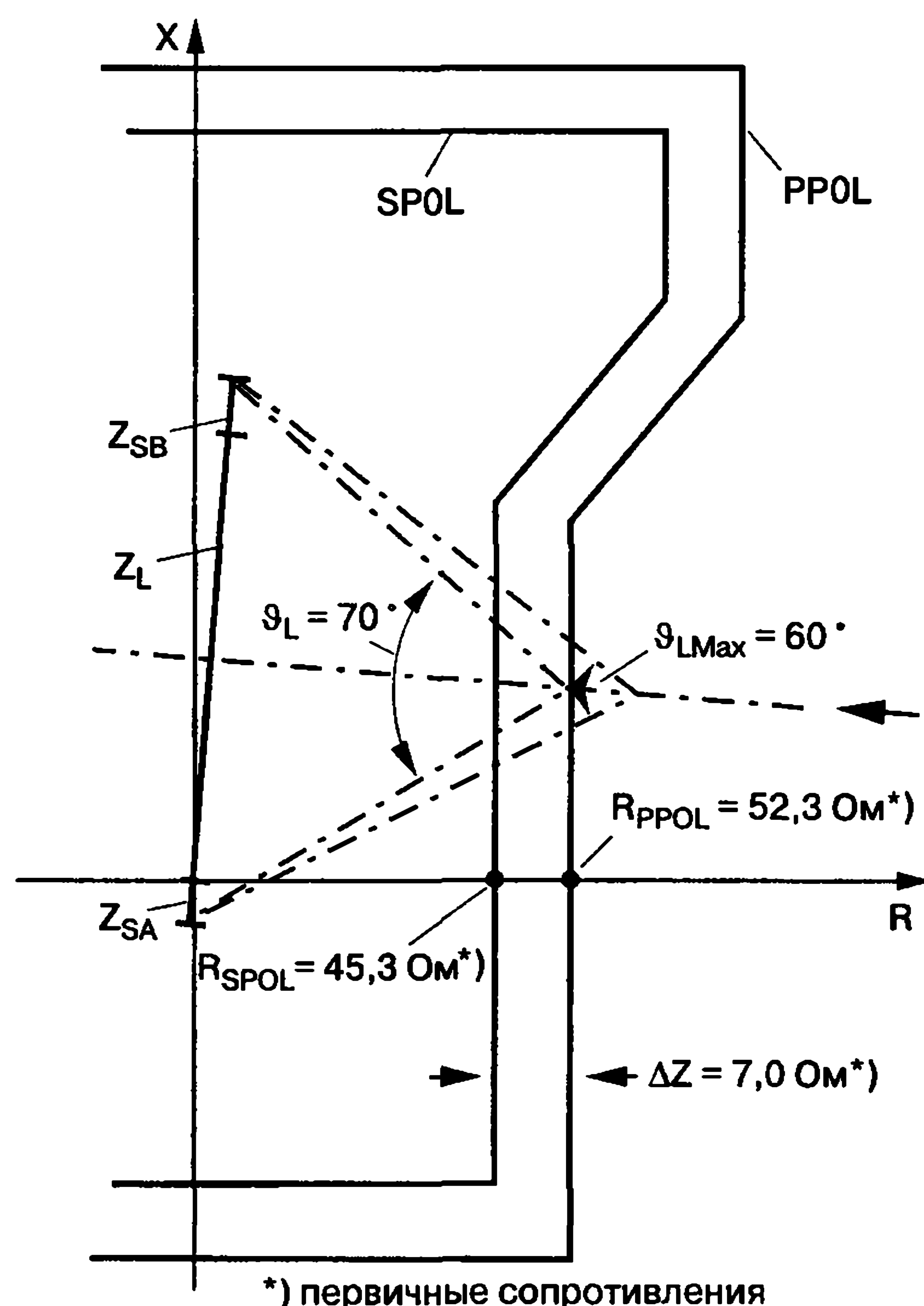


Рис. 6.12. Уставки блокировки при качаниях в 7SA511 (к примеру расчета)

$$R_{PPOL} = \frac{73,2}{2}\operatorname{ctg}\left(\frac{70°}{2}\right) = 52,3 \text{ Ом}.$$

Скорость изменения вектора в этой точке:

$$\left(\frac{dR_{\text{реле}}}{dt}\right)_{PPOL} = \frac{\pi}{2}\cdot 73,2 \times$$

$$\times\ 2,0\cdot \operatorname{tg}\left(\frac{70°}{2}\right) = 161 \text{ Ом/с}.$$

Для проведения измерений необходимо, по крайней мере, 35 мс (время, пока вектор сопротивления пройдет расстояние от внешнего многоугольника до внутреннего в реле 7SA511).

Многоугольник ПО защиты, определяющего замыкание (SPOL), должен быть меньше, чем многоугольник, определяющий область качаний (PPOL), на минимальную величину ΔZ.

Получаем следующие значения:

$$\Delta Z_{\text{перв}} \geqslant 0,035\frac{dR_{\text{реле}}}{dt} = 0,035\cdot 161 = 5,6 \text{ Ом};$$

$$R_{SPOL\text{-перв}} = 52,3 - 5,6 = 46,7 \text{ Ом}.$$

Необходимо заметить, что вектор сопротивления при качаниях ускоряется при прохождении расстояния от одной характеристики до другой и время, необходимое для этого, должно быть проверено ещё раз.

Угол нагрузки, при котором вектор сопротивления попадает внутрь характеристики пускового органа защиты, можно получить из выражения (6.4).

$$\delta = 2\operatorname{arcctg}\frac{R_{SPOL}}{Z_\Sigma/2} = 2\operatorname{arctg}\frac{Z_\Sigma/2}{R_{SPOL}} =$$

$$= 2\operatorname{arctg}\frac{73,2/2}{46,7} = 76,2°.$$

Скорость изменения сопротивления в этой точке равна:

$$\left(\frac{dR_{реле}}{dt}\right)_{SPOL} = \frac{\pi}{2} \cdot 73{,}2 \cdot 2{,}0 \times$$
$$\times \operatorname{tg}\left(\frac{76{,}3^\circ}{2}\right) = 180 \text{ Ом/с}.$$

Таким образом скорость изменения сопротивления на границе характеристики срабатывания ПО защиты (SPOL) возросла приблизительно на 12 % по сравнению со скоростью вхождения вектора в область качаний PPOL. Поэтому время прохождения вектором расстояния между двумя характеристиками меньше 35мс. По этой причине уставка ΔZ увеличивается примерно с 5,6 Ом до 7,0 Ом. Уставка многоугольной характеристики пускового органа защиты уменьшается до значения: 52,3 – 7,0 = 45,3 Ом.

Для задания данных уставок в реле их необходимо привести ко вторичной стороне измерительных трансформаторов.

Коэффициент приведения:

$$k_z = \frac{k_I}{k_U} = \frac{800/1}{230/0{,}1} = 0{,}348.$$

Отсюда получаем значение уставки реле:

$R_{SPOL\text{-втор}} = 45{,}3 \cdot 0{,}348 = 15{,}8$ Ом; выбираем 16 Ом.

$\Delta Z = 7 \cdot 0{,}348 = 2{,}44$, выбираем 2,5 Ом.

$$\left(\frac{dR_{реле}}{dt}\right)_{втор} = 180 \cdot 0{,}348 = 62{,}6 \text{ Ом/с}.$$

Итак, уставки блокировки при качаниях в реле 7SA511задаются с помощью ΔZ и dR/dt. Многоугольник ПО блокировки при качаниях охватывает многоугольник ПО защиты с постоянным запасом ΔZ.

Далее необходимо выбрать программу действия логической части: блокировка определенной или всех зон, отключение при качаниях.

В нашем случае выбирается уставка по умолчанию — «блокировка всех зон».

Программу «отключение качаний» необходимо выбирать, если линия должна быть отключена при выпадении системы из синхронизма (см. п.п. 3.1.11).

Блокировка при качаниях мощности без уставок

Терминалы 7SA6 и 7SA522 не требуют уставок. Внешняя характеристика блокировки при качаниях мощности автоматически располагается вокруг наибольшей из характеристик срабатывания ступеней и отстоит от неё на фиксированное значение ΔZ, равное 5 Ом (1 А), что изображено на рис. 6.13. Этот улучшенный метод также удовлетворяет дополнительным требованиям систем СВН:

блокировка функционирует даже при очень большом расхождении частот (около 7 Гц);

блокировка при качаниях функционирует совместно с однофазным АПВ, а также во время бестоковой паузы;

система измерений способна определить трехфазные замыкания в условиях существования качаний и вывести блокировку;

функция блокирования при качаниях введена только при трехфазном симмет-

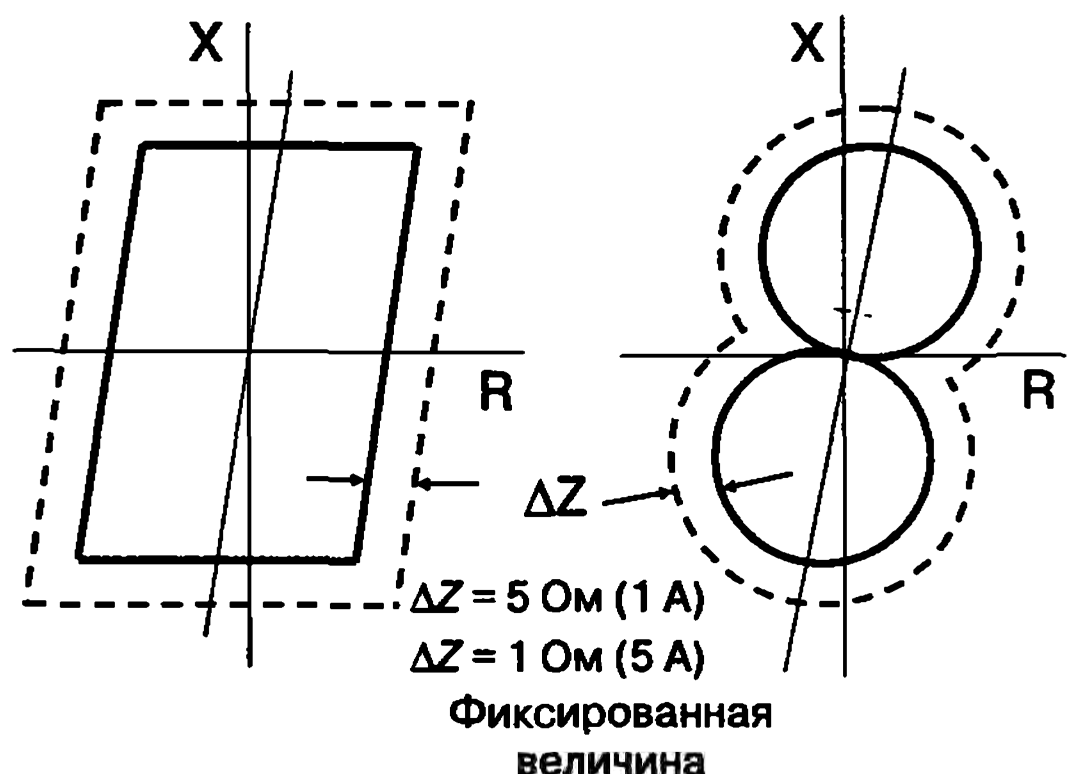


Рис. 6.13. Блокировка при качаниях без уставок (в реле 7SA522 и 7SA6)

ричном режиме (несимметрия < 25%) и может быть выведена при обнаружении тока нулевой последовательности (опция).

Замечание:

При применении блокировки от качаний необходимо использовать пуск защиты по сопротивлению, так как согласование многоугольной характеристики пускового органа блокировки и характеристики направленного пуска невозможна. Характеристика направленного пуска изменяет свой размер на диаграмме сопротивлений в зависимости от сопротивления источника (см. п.п. 3.1.6, рис. 3.22), тогда как размер многоугольника пускового органа блокировки от качаний не изменяется.

7. Примеры расчётов

Процедура параметрирования реле на обычных одноцепных линиях описана в руководствах по эксплуатации реле на примерах.

В этом разделе рассмотрены особенности применения защит.

7.1. Двухцепные линии в системах с заземлённой нейтралью

В этом случае выбор уставок ступеней защиты от КЗ на землю требует более сложных расчётов, так как большое влияние оказывает сопротивление нулевой последовательности системы. Основные выводы были сделаны в п.п. 3.5.3.

Основной алгоритм

Первоначально рекомендуется определить зоны действия ступеней защиты от междуфазных КЗ без учёта влияния параллельной линии.

Затем проверяются области действия ступеней при замыканиях на землю и выбирается соответствующий коэффициент компенсации тока нулевой последовательности (тока в земле).

Необходимо рассмотреть использование компенсации влияния параллельной линии для того, чтобы обеспечить достаточную чувствительность резервной защиты при возникновении удаленных замыканий на землю.

Выбор ступеней дистанционной защиты от межфазных замыканий

Области действия ступеней должны быть установлены в соответствии с основными принципами выполнения ступенчатых защит (см. п.п. 3.1.14). Для резервных ступеней важным является тот факт, что зависимость сопротивления от расстояния до места замыкания имеет параболический характер (рис. 3.61, п.п. 3.1.14).

Более того, на двухцепных линиях, соединённых последовательно, области действия резервных ступеней могут изменяться в зависимости от условий работы линии и источника питания на противоположном конце (рис. 3.63, п.п. 3.1.14).

Теоретически выбор ступеней на двухцепных линиях значительно осложняется [3.21, 3.34].

На практике, однако, принимаются упрощения.

Для определения уставки второй ступени на одноцепной линии *A-B*, за которой следуе1 двухцепная *B-C*, можно использовать соотношение:

$$Z_{2A} = K_{\text{отс2}}(Z_{A-B} + 0{,}5Z_{B-C}). \qquad (7.1)$$

Третья ступень выбирается в соответствии с выбранной стратегией выполнения резервной защиты. Согласование ступеней, позволяющее обеспечить селективное отключение в любых условиях работы системы, ведёт к тому, что зоны, защищаемые третьими ступенями, становятся относительно короткими, не намного превышая зоны защиты вторых ступеней. В этом случае уставка третьей ступени определяется следующим образом:

$$Z_{3A} = 1{,}1(Z_{A-B} + Z_{B-C}). \qquad (7.2)$$

Что касается области действия пускового органа защиты (4-я ступень), то смежная линия должна находиться внутри его зоны срабатывания (пусковой) даже в наиболее неблагоприятных условиях (одноцепная линия после двухцеп-

ной). Уставка рассчитывается следующим образом:

$$Z_{+FD} = 1,1,(Z_{A-B} + 2Z_{B-C}). \quad (7.3)$$

В общем случае на промежуточных шинах двухцепной линии может находиться источник питания, что необходимо учитывать при выборе областей действия ступеней. Это проиллюстрировано на следующем примере.

Пример.

Рассчитать уставки ступеней дистанционной защиты двухцепной линии от междуфазных замыканий.

Дано:

Двухцепная линия напряжением 400 кВ.

Схема представлена на рис. 7.1.

Параметры линии:

$l_1 = l_2 = 150$ км, $l_3 = l_4 = 80$ км;

$Z'_{1L} = 0{,}0185 + j0{,}3559$ Ом/км;

$Z'_{0L} = 0{,}2539 + j1{,}1108$ Ом/км;

$Z'_{0M} = 0{,}2354 + j0{,}06759$ Ом/км;

$P_{нат} = 518$ МВт на линию.

Трансформатор тока: 2000/1 А.

Трансформатор напряжения: 400/0.1 кВ.

Параметры источников указаны на рис. 7.1.

Задание.

Рассчитать уставки защиты $D1$

Решение.

Для упрощения расчет токов КЗ произведём без учёта активного сопротивления:

$X_{L1} = X_{L2} = 0{,}03559 \cdot 150 = 53{,}4$ Ом;

$X_{L3} = X_{L4} = 0{,}3559 \cdot 80 = 28{,}5$ Ом.

Обычно для первых ступеней используется коэффициент отстройки, равный 85 % ($K_{отс1} = 0{,}85$).

Тогда получаем следующую область действия: $X_1 = 0{,}85 \cdot 53{,}4 = 45{,}4$ Ом

Для селективного выбора уставки второй ступени предполагается, что параллельная линия $L2$ отключена, но мощность

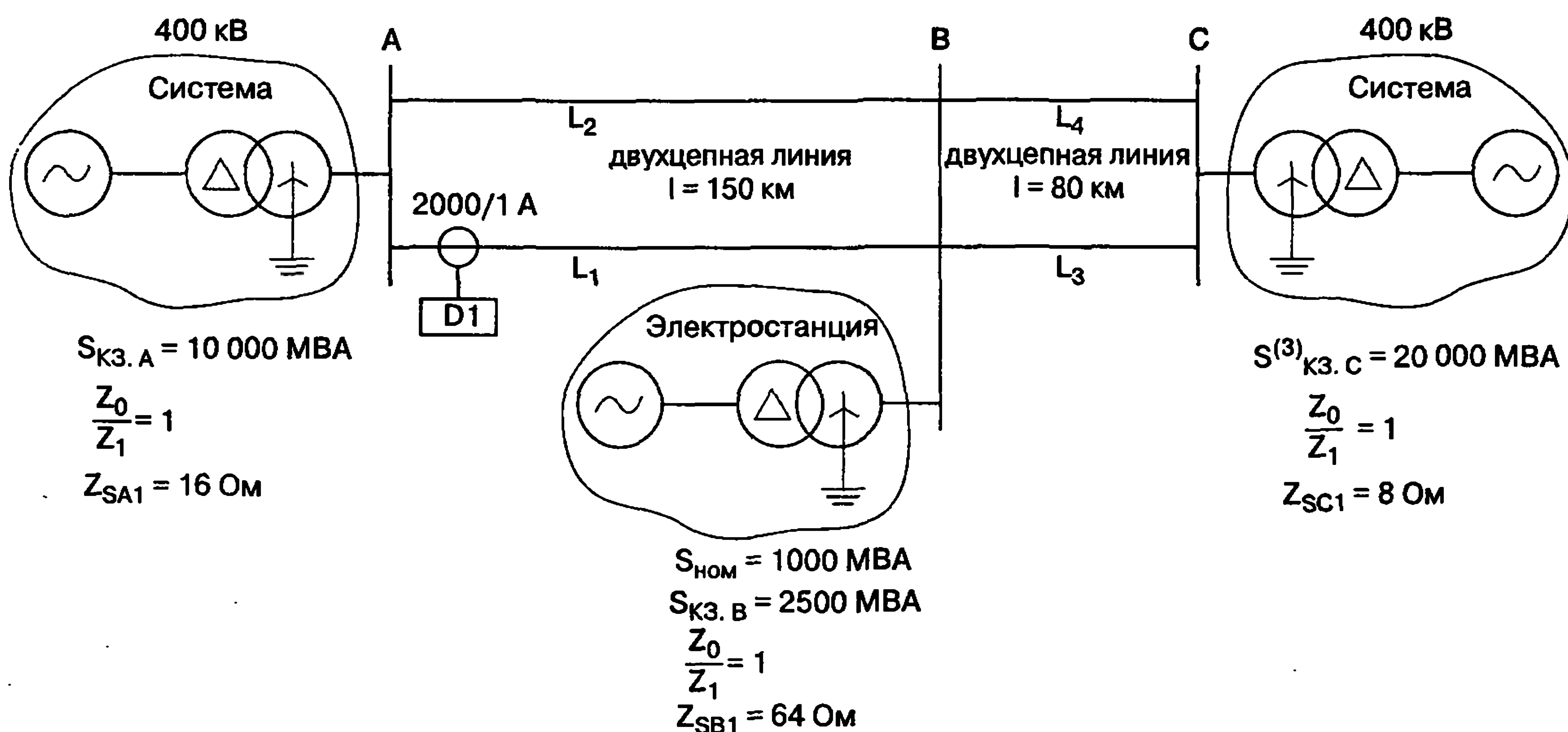


Рис. 7.1. Схема сети для расчета уставок дистанционной защиты двухцепной линии

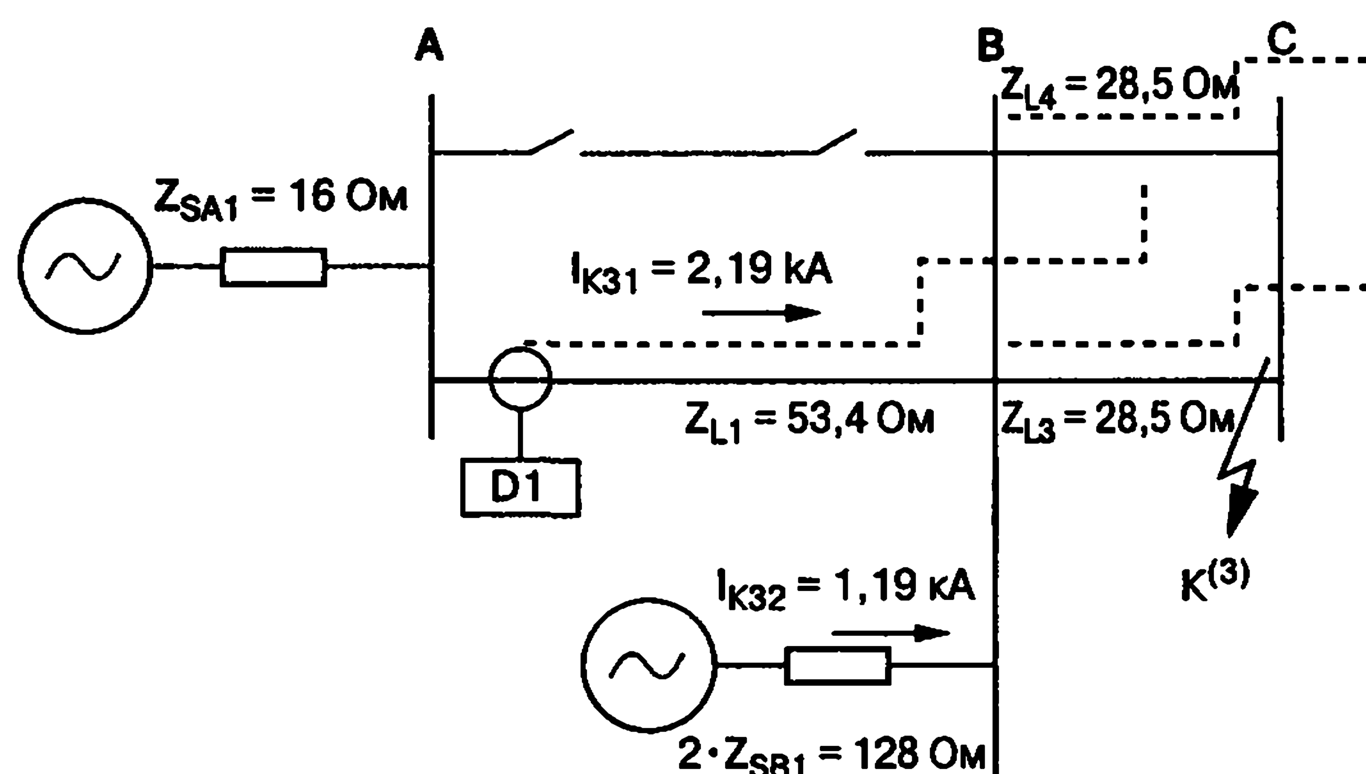


Рис.7.2. Эквивалентная схема замещения сети (к расчету уставок дистанционной защиты)

промежуточного источника питания на подстанции В составляет, по крайней мере, половину мощности короткозамкнутого контура.

Производится селективный выбор вторых ступеней относительно конца области действия первых ступеней дистанционных защит на линиях 3 и 4.

Это означает, что можно использовать приблизительно половину сопротивления линии. Эквивалентный контур короткого замыкания упрощается (рис. 7.2).

При трёхфазном замыкании на шинах С в линиях протекают токи, значения которых указаны на рис. 7.2.

Учитывая влияние источника промежуточной подпитки, получаем:

$$X_2 = \left(53{,}4 + \left(1 + \frac{1{,}19}{2{,}19}\right)\right) \cdot 0{,}85 = 64\ \text{Ом} =$$
$$= 120\,\%\,X_{L1}.$$

Учитывая вышеупомянутые рекомендации, для третьей ступени получаем следующую уставку:

$$X_3 = (53{,}4 + 28{,}5) \cdot 1{,}1 = 90{,}1\ \text{Ом} =$$
$$= 169\,\%\,X_{L1}.$$

А для пусковой ступени:

$$X_{+FD} = (53{,}4 + 2 \cdot 28{,}5) \cdot 1{,}1 = 121\ \text{Ом} =$$
$$= 226\,\%\,X_{L1}.$$

Далее необходимо проверить зоны действия защиты в реальных условиях с учетом всех источников, показанных на рис. 7.1. Параллельное включение линий 3 и 4 приводит к параболической зависимости измеряемых сопротивлений (см. 3.1.14). Это усиливается влиянием мощного удаленного источника (рис. 7.3).

Процедура расчета приведена в Приложении П.2.

Расчет показал, что резервные ступени имеют небольшие зоны резервирования: вторая ступень охватывает только около 8% длины следующих линий; третья — около 28%, а пусковая ступень не срабатывает при КЗ в конце смежных линий (см.рис. 7.3).

Область действия при замыканиях на землю

Коэффициент компенсации токов замыкания на землю k_E является определяющим для измерительной системы фаза—земля. Для одноцепных линий он

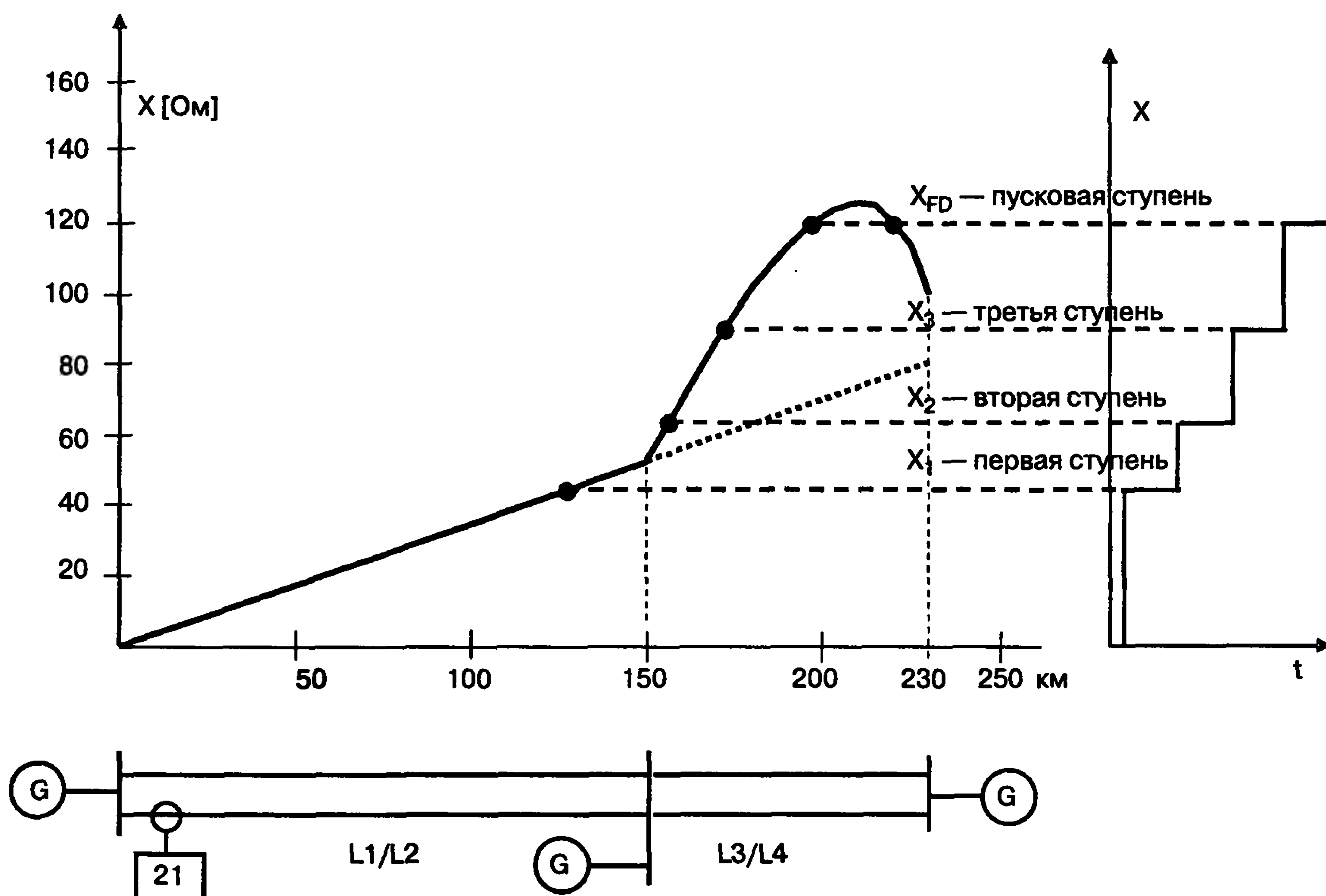


Рис.7.3. Результаты расчета зон, защищаемых резервными ступенями дистанционной защиты при замыканиях фаза-земля

соответствует значению $\underline{Z}_E/\underline{Z}_L$ линии. При его учете защитой определяются одни и те же сопротивления при междуфазных замыканиях и замыканиях на землю.

На двухцепных линиях возникает погрешность измерений, связанная с сопротивлением взаимоиндукции нулевой последовательности параллельных линий (см. п.п. 3.5.3). Погрешность можно устранить при использовании компенсации влияния параллельной линии. Реле 7SA включают в себя эту функцию. Для использования этой функции необходимо подать в реле ток нулевой последовательности параллельной линии и задать значение сопротивления взаимной индукции. Отношение x/l можно оставить равным стандартному значению x/l = 85 %.

Значение коэффициента компенсации в этом случае должно быть равно значению $\underline{k}_E$ для одноцепной линии.

Уставка коэффициента компенсации токов замыкания на землю $\underline{k}_E$ (режим работы без компенсации влияния параллельной линии)

Если компенсация влияния параллельной линии не используется, то необходимо подобрать соответствующее значение $\underline{k}_E$ для того, чтобы обеспечить достаточную зону защиты в любом режиме работы двухцепной линии (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Дистанционные измерения при замыканиях на землю.
Влияние на область действия в направлении X уставки k_{XER} и режима работы

Уставки реле. Первая ступень: Коэффициент отстройки $k_{отс1} = 0{,}85$ Коэффициент компенсации k_{XER}	Достигаемая область x/l при однофазных замыканиях на землю		
	$\frac{x}{l} = k_{отс1}\frac{1+k_{XER}}{1+k_{XEL}}$	$\frac{x}{l} =$ см. выражение (7.7)	$\frac{x}{l} = \frac{(1+k_{XEL})\cdot k_{отс1}}{1+k_{XEL}-k_{XEM}\cdot\frac{X'_{0M}}{X'_{0L}}}$ а)
$k_{ER} = \frac{1+k_{EL}}{k_{отс1}}\cdot\frac{x}{l} - 1 = 0{,}71(0{,}5)$	85 % (75 %)	71 % (64 %)	108 % (98 %)
$k_{XER} = \frac{1+k_{XEL}+k_{XEM}\cdot\frac{x/l}{2-x/l}}{k_{отс1}} - 1 = 1{,}18$	108 %	85 %	132 %
$k_{XER} = \frac{1+k_{XEL}+k_{XEM}\cdot\frac{X'_{0M}}{X'_{0L}}}{k_{отс1}}\cdot\frac{x}{l} - 1 = 0{,}31$	65 %	56 %	85 %

Параметры линии: $X'_{0M} = 0{,}72$ Ом/км, $X'_{0L} = 1{,}11$ Ом/км, $X'_{1L} = 0{,}356$ Ом/км

Коэффициенты компенсации: $k_{XEL} = \left(\frac{X'_{EL}}{X'_{1L}}\right)_{лин} = 0{,}71$; $k_{XEM} = \left(\frac{X'_{0M}}{3\cdot X'_{1L}}\right) = 0{,}64$.

а) Это выражение применяется, если $\frac{x}{l} < 1$; если $\frac{x}{l} > 1$, то: $\frac{k_{отс1}(1+k_{XER})+k_{XEM}\cdot\frac{X'_{0M}}{X'_{0L}}}{1+k_{XEL}}$

Адаптация уставок защиты к конкретному режиму работы ведёт к увеличению или уменьшению защищаемой зоны при других режимах работы. Коэффициент отстройки $K_{отс1}$ обеспечивает селективную работу первой ступени (область действия для междуфазных замыканий). Отношение x/l в % определяет зону действия пер-

вой ступени (контур фаза—земля) при замыканиях на землю (относительно длины линии l).

Определение уставки $\underline{k}_{ER}$ рассмотрено на примере работы двухцепной линии.

При замыкании на расстоянии x/l напряжение в месте установки реле равно:

$$\underline{U}_{\Phi-E}=\frac{x}{l}\underline{Z}_L\underline{I}_\Phi+\frac{x}{l}\underline{Z}_E\underline{I}_E+\frac{x}{l}\frac{\underline{Z}_{0M}}{3}\underline{I}_{EP}$$

Для линии с односторонним питанием:

$$I_\Phi=I_E \text{ и } I_{EP}=\frac{x/l}{2-x/l}I_E.$$

При проведении измерений в контуре фаза—земля получаем следующее:

$$\underline{Z}_{\Phi-E}=\frac{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}}{\underline{I}_\Phi+\underline{k}_{ER}\cdot\underline{I}_E}=$$

$$=\frac{x}{l}\frac{Z_L+Z_E+\frac{\underline{Z}_{0M}}{3}\cdot\frac{x/l}{2-x/l}}{1+\underline{k}_{ER}},\qquad(7.4)$$

$\underline{k}_{ER}$ — комплексный коэффициент компенсации токов замыкания на землю, задаваемый в реле.

Для цифровых реле 7SA значения R и X рассчитываются отдельно.

Если фазные токи и токи в земле имеют одинаковые фазные отношения, то используются упрощённые выражения (3.54) и (3.55). Соответственно, из выражения (7.4):

$$X_{\Phi-E}=\frac{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\cdot\sin\varphi_k}{\underline{I}_\Phi+\left(\frac{X_E}{X_L}\right)_R\cdot\underline{I}_E}=$$

$$=\frac{x}{l}X_L\frac{1+\frac{X_E}{X_L}+\frac{X_{0M}}{3\cdot X_L}\cdot\frac{x/l}{2-x/l}}{1+\left(\frac{X_E}{X_L}\right)_R},$$

$$R_{\Phi-E}=\frac{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\cdot\cos\varphi_k}{\underline{I}_\Phi+\left(\frac{R_E}{R_L}\right)_R\cdot\underline{I}_E}=$$

$$=\frac{x}{l}R_L\frac{1+\frac{R_E}{R_L}+\frac{R_{0M}}{3\cdot R_L}\cdot\frac{x/l}{2-x/l}}{1+\left(\frac{R_E}{R_L}\right)_R}.$$

Для первоначального определения защищаемой области только значение X является существенным. При $k_{XEL}=\left(\frac{X_E}{X_L}\right)$ и $k_{XEM}=\left(\frac{X_{0M}}{3\cdot X_L}\right)$ и уставке $k_{XER}=\left(\frac{X_E}{X_L}\right)_R$ получаем следующее:

$$X_{\Phi-E}=\frac{x}{l}X_L\frac{1+k_{XEL}+k_{XEM}\cdot\frac{x/l}{2-x/l}}{1+k_{XER}}.\qquad(7.5)$$

Измерительные системы «фаза—земля» и «фаза—фаза» имеют одинаковые значения сопротивлений срабатывания (общая уставка Z1). Справедливо следующее: $Z_{\Phi-E}=Z_{\Phi-\Phi}=Z_1=K_{\text{отс}1}Z_L$, где $K_{\text{отс}1}$ — коэффициент отстройки первой ступени.

Для расчёта уставки коэффициента компенсации токов замыкания на землю можно использовать следующее выражение:

$$k_{XER}=\frac{1+k_{XEL}+k_{XEM}\cdot\frac{x/l}{2-x/l}}{k_{\text{отс}1}}\cdot\frac{x}{l}-1.\qquad(7.6)$$

Область действия измерительной системы при замыканиях на землю можно изменить при помощи уставки k_{XER}, в то время как зона действия для междуфазных замыканий остается постоянной ($K_{\text{отс}1}$ в % от Z_L).

Из выражения (7.6) можно получить соотношение для определения x/l. Полу-

чаем область действия для заданного значения k_{XER}:

$$\frac{x}{l} = \frac{[k_{\text{отс}1} \cdot (1 + k_{XER}) + 2 \cdot (1 + k_{XEL})] -}{2 \cdot (1 + k_{XEL} -} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\sqrt{[\ldots]^2 - 8(1 + k_{XEL} - k_{XEM}) \cdot k_{\text{отс}1}}}{- k_{XEM}}. \quad (7.7)$$

Аналогичным образом можно получить выражения, приведенные в табл. 7.1 для случаев «отключенной параллельной линии» и «отключенной параллельной линии и заземленной с обеих сторон».

Стратегия выбора уставок первой ступени параллельных линий

Для выбора уставки k_{XER} необходимо найти компромисс между всеми тремя случаями (табл. 7.1)[27].

Коэффициент $K_{\text{отс}1}$ = 85 %, используемый для одноцепной линии, является приемлемым. Отключение и заземление линии с обеих сторон осуществляется только во время текущих ремонтов, поэтому излишний охват, равный 8 %, возникает очень редко. В общем случае зона излишнего охвата сужается из-за влияния промежуточной подпитки. Совместно с ОАПВ излишний охват приведёт к излишнему АПВ и не вызовет окончательного отключения в предположении, что КЗ является неустойчивым (~90 % от всех КЗ).

С другой стороны, область действия при замыканиях на землю можно несколько уменьшить, задав меньшее значение k_{XER}. В рассмотренном примере при уменьшении k_{XER} с 0.71 до 0.5 излишнего охвата не будет. Однако область действия при обеих включенных линиях будет составлять только 64 %. Кроме того, необходимо заметить, что влияние сопротивления взаимной индукции параллельных линий максимально в наихудшем случае одностороннего питания. В нормальных условиях при двустороннем питании ток нулевой последовательности в параллельной линии при возникновении замыкания, близкого к середине линии, значительно ниже и область действия практически равна области действия на одноцепной линии. (см, рис.7.5 ниже)

Кроме того, соединение параллельных линий на другом конце всегда приводит к обратному эффекту, т. е. вызывает увеличение области действия. При использовании схемы с передачей разрешающего сигнала быстрое отключение замыканий всегда гарантировано.

Однако необходимо заметить, что уменьшение k_{XER} вызывает уменьшение областей действия резервных ступеней защиты при замыканиях на землю. Это могло бы быть скомпенсировано использованием отдельно регулируемого поправочного коэффициента, учитывающего неодинаковость сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛ, для расширения зоны. В настоящее время этот коэффициент обеспечивается современными цифровыми реле (7SA6, 7SA522). Это рассмотрено ниже.

В предыдущих типах реле, где существует только общий коэффициент K_{XER}, небольшое снижение зоны действия ($k_{\text{отс}1}$ = = 0,8) также следует рассматривать в качестве альтернативного способа для того,

---

[27] Численные значения, приведенные в табл. 7.1, рассчитаны для линии, рассмотренной в предыдущем примере. Для упрощения расчетов использовались только активные составляющие комплексных значений $\underline{k}_{EL} = 0{,}71 - j0{,}18$ и $\underline{k}_{EM} = 0{,}64 - j0{,}18$, которые в первом приближении соответствуют значениям $k_{XEL} = \left(\frac{x_E}{x_L}\right)$ и $k_{XEM} = \left(\frac{x_{0M}}{3 \cdot x_L}\right)$. Такие расчёты для систем СВН дают достаточно точные результаты.

чтобы избежать уменьшения зоны резервирования.

Уставки ступеней с полным охватом

Уставка Z_{1B} должна составлять 120—130 % от Z_L. Эта же уставка применяется и при замыканиях на землю при использовании компенсации влияния параллельной линии.

Без использования компенсации область действия при включенной параллельной линии должна составлять 120 % с учётом заранее определённого коэффициента k_{XER}.

Для этой цели, уравнение (7.6) решено относительно коэффициента отстройки $K_{отс1}$($K_{отс1} = K_{отс}$).

$$k_{отс} = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{x/l}{2 - x/l}}{1 + k_{XER}} \cdot x/l. \quad (7.8)$$

В случае замыкания в конце линии (x/l = 100 %), с учётом запаса в 20 %, для определения уставки ступени с полным охватом защищаемой зоны получаем следующее выражение:

$$X_{1B} = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM}}{1 + k_{XER}} X_L \cdot 1{,}2. \quad (7.9)$$

При выборе k_{XER} = 0,71 получаем X_{1B} = 165 % X_L.

Таким образом, если компенсация влияния параллельной линии не используется, то ступень с полным охватом должна иметь очень большую уставку для того, чтобы обеспечить запас в 20 %, если обе линии включены.

Замечание.

Современные цифровые реле предлагают возможность установки индивидуального поправочного коэффициента, учитывающего неодинаковость сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛ, для расширения зоны действия.

Мы можем в таком случае регулировать уставку для расширения зоны действия следующим образом.

Для зоны, охватывающей 100% линии, мы сначала примем показатель $k_{отс1}$ = 1 и подсчитаем индивидуальный поправочный коэффициент для x/l = 1 по (7-6):

$$K_{XER\text{-}2} = (1 + 0{,}71 + 0{,}64)/1 - 1 = 1{,}35.$$

Используя запас по надежности 20%, можно получить в результате значение

$$X_{1B} = \frac{1 + 0{,}71 + 0{,}64}{1 + 1{,}35} \cdot X_{L1} \cdot 1{,}2 = 1{,}2X_{L1}$$

Область действия резервных ступеней при замыканиях на землю

Рассмотрено поведение дистанционной защиты при использовании и без использования компенсации влияния параллельной линии.

Одностороннее питание

Для понимания метода расчета сначала рассматривается более простой случай (см. рис. 7.4).

В режиме, когда линия L2 отключена, а линии L3 и L4 работают параллельно, вторая ступень защиты L1 имеет наибольшую зону действия. В этом режиме следует обеспечить ее согласование (селективность) с первыми ступенями защиты L3 и L4.

При расчете второй ступени промежуточный источник учитывается сниженной в два раза по отношению к номинальной мощностью. Как показано на рис. 7.4, ток, обусловленный промежуточным источником, составляет определенную часть от тока КЗ в линии L1: $I_5 = k \cdot I_{kL}$, причем в рассматриваемом примере k = 0,84. В более общем виде можно записать:

$$\underline{I}_{ф1} = \underline{I}_{E1} = \underline{I}_{KL} \text{ и } \underline{I}_{ф5} = \underline{I}_{E5} = k\underline{I}_{KL}$$

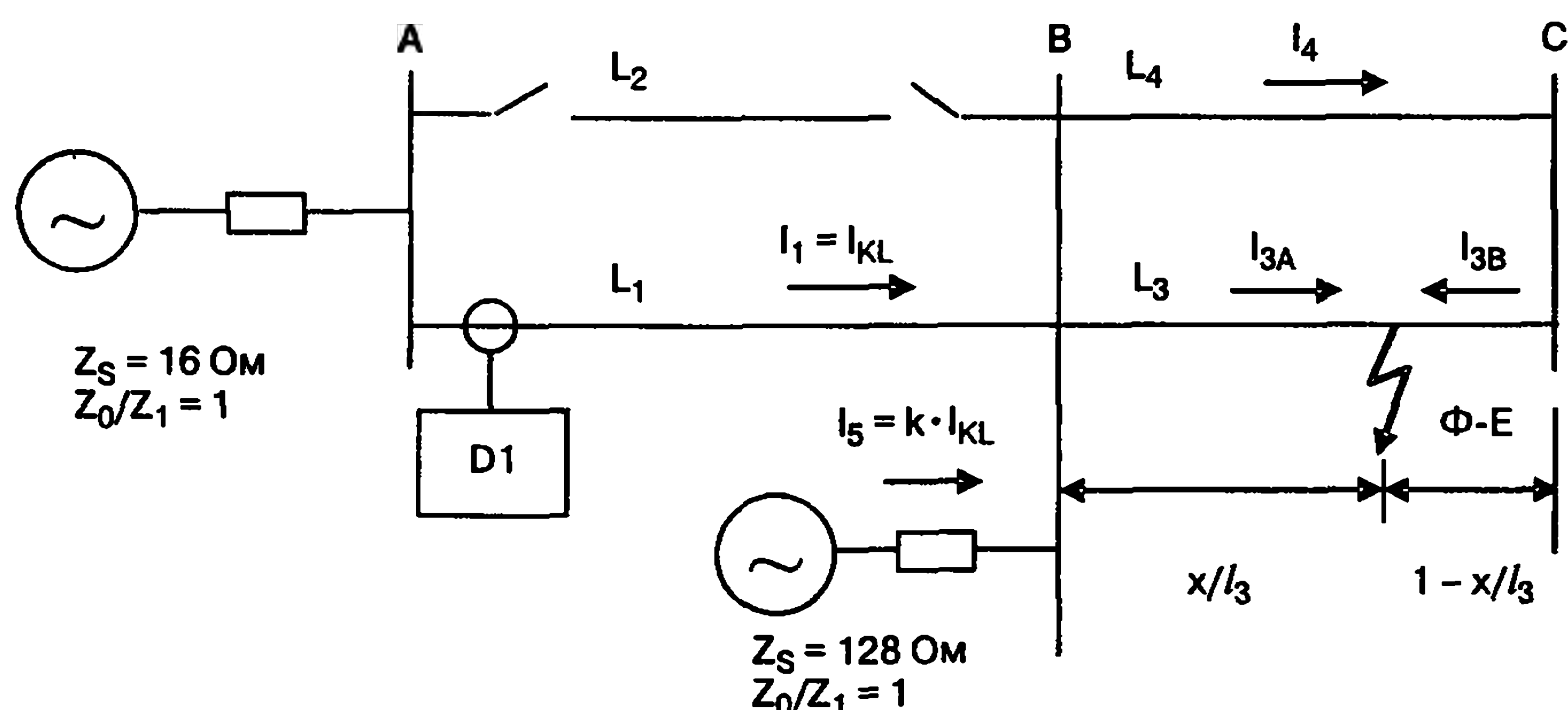


Рис. 7.4. Эквивалентная схема цепи для расчета замыканий на землю (к выбору уставок защит на двухцепных линиях)

Тогда полный ток КЗ равен $(1 + k)\underline{I}_{KL} = \underline{I}_{3A} + \underline{I}_4$.

Напряжение в месте установки защиты определяется соотношением:

$$\underline{U}_{\Phi\text{-}E} = \underline{Z}_{L1} \cdot \underline{I}_{\Phi 1} + \underline{Z}_{E1} \cdot \underline{I}_{E1} + \frac{x}{l_3}\underline{Z}_{L3} \cdot \underline{I}_{\Phi 3A} + \frac{x}{l_3}\underline{Z}_{E3} \cdot \underline{I}_{E3A} + \frac{x}{l_3}\frac{\underline{Z}_{0M3\text{-}4}}{3} \cdot \underline{I}_{E4}. \quad (7.10)$$

Токи:

$$\underline{I}_{\Phi 3} = \underline{I}_{E3} = (1 + k)\left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{l_3}\right)\underline{I}_{KL} \text{ и } \underline{I}_{E4} = (1 + k)\frac{1}{2} \cdot \frac{x}{l_3}\underline{I}_{KL}$$

Подставляя выражения для токов в (7.10) и разделив $\underline{U}_{\Phi\text{-}E}$ на ток $(\underline{I}_{\Phi 1} + k_{XER}\underline{I}_{E1})$, можно получить соотношение для расчета измеряемого сопротивления:

$$X_{\Phi\text{-}E} = \frac{1 + k_{XEL1}}{1 + k_{XER}} \cdot X_{L1} + \frac{(1 + k)\left[\frac{x}{l_3}\left(1 - \frac{x}{2 \cdot l_3}\right) \cdot (1 + k_{XEL3}) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x}{l_3}\right)^2 \cdot k_{XEM3\text{-}4}\right]}{1 + k_{XER}} \times X_{L3} \quad (7.11)$$

Решая относительно $\frac{x}{l_3}$, можно получить следующий результат:

$$\frac{x}{l_3} = \frac{(1 + k_{XEL3}) - \sqrt{(1 + l_{XEL3})^2 - (1 + k_{XEL3} - k_{XEM3\text{-}4}) \cdot \Delta}}{(1 + k_{XEL3} - k_{XEM3\text{-}4})} \quad (7.12)$$

где $\Delta = \frac{2}{1 + k} \cdot \frac{X_{L1}}{X_{L3}}\left[(1 + k_{XER}) \times \frac{X_Z}{X_{L1}} - (1 + k_{XEL1})\right]$,

а X_Z – защищаемая зона.

При наличии источника промежуточной подпитки с $k = 0{,}84$ получены следующие результаты.

Вторая ступень с уставкой 120% X_{L1} охватывает $\frac{x}{l_3} = 22\%$.

Третья ступень с уставкой 169% X_{L1} охватывает $\frac{x}{l_3} = 104\%$, т.е. шины C.

Пусковая ступень охватывает шины С с большим запасом.

Селективность защиты обеспечивается в самом неблагоприятном случае.

Далее находим зоны действия при повреждении фаза-земля для реального случая с многочисленными источниками питания, чтобы увидеть, будет ли достаточно гарантированным удаленное резервирование.

Подсчеты для этих целей весьма затруднительны и в настоящее время используются удобные компьютерные программы. При ручных расчетах пренебрегаем нагрузкой и предполагаем равенство питающих ЭДС. Это допустимое приближение для практического расчета зоны действия (более высокие сопротивления КЗ здесь не рассматриваются). Расчет рассмотрен в деталях в приложении, П.2. Рассчитанные зоны действия показаны на рисунке 7.5.

Получены следующие результаты.

Самая короткая зона первой ступени X1 защищаемой линии охватывает 70% длины этой линии. С несколькими источниками охват немного выше. С компенсацией влияния параллельной линии зона расширяется до 95%.

Зоны резервных ступеней резко уменьшаются при наличии мощного удаленного источника на шинах С и промежуточного источника на шинах В. Без компенсации влияния параллельной линии вторая зона не достигнет даже конца линии L1.

С учетом компенсации влияния параллельной линии зона действия несколько

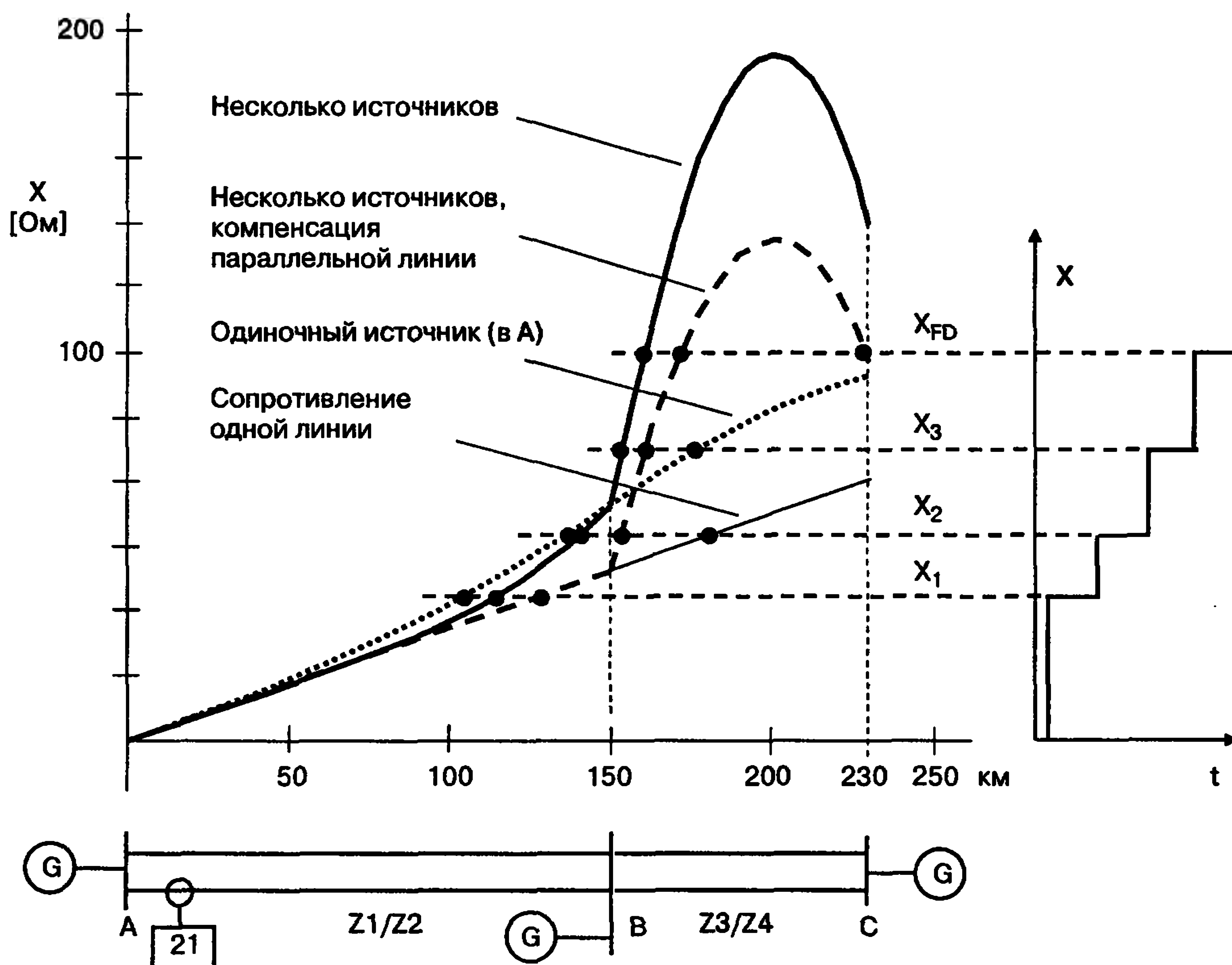


Рис. 7.5. Зона действия защиты при замыканиях на землю (пример расчета)

улучшена благодаря тому, что за противоположной станцией B поправочный коэффициент $k^*_{XER} = (1 + k_{XER} + + k_{XEMR})/(l + k_{XER})$ становится эффективным. Например, в равенстве (7.12) коэффициент k_{XER} = 0,71 должен быть заменен на $(k_{XER} + k_{XEMR})$ = 0,71 + 0,64 = 1,35.

Современные цифровые реле позволяют устанавливать индивидуальный поправочный коэффициент $k_{XER\text{-}2}$ (коэффициент, учитывающий неодинаковость сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛ), который будет эффективным для ступени с полным охватом линии и резервных ступеней. Для этих зон уставка $k_{XER\text{-}2}$ = 1,35 будет иметь такое же влияние, что и компенсация параллельной линии. Более высокая уставка $k_{XER\text{-}2}$, однако, неприемлема, потому что расширение второй зоны приведет к охвату КЗ вблизи шин C (уменьшенное сопротивление будет измерено за максимумом параболы). Это показано на рисунке 7.6 для случая, когда параллельная линия L2 отключена. Критический случай будет, когда отключенная линия заземлена с обоих концов. В этом случае повреждение на шинах C будет на границе зоны действия второй ступени.

R-уставка

Зона действия в направлении R согласована с сопротивлением натуральной нагрузки линии:

$$Z_{нат} = \frac{U^2_{ном}}{P_{нат}} = \frac{400^2}{518} = 309\ [\text{Ом}]$$

Предполагается, что каждая линия должна быть способна выдержать в течение короткого промежутка времени ток, в два раза превышающий номинальный, и иметь дополнительный запас надежности 30%.

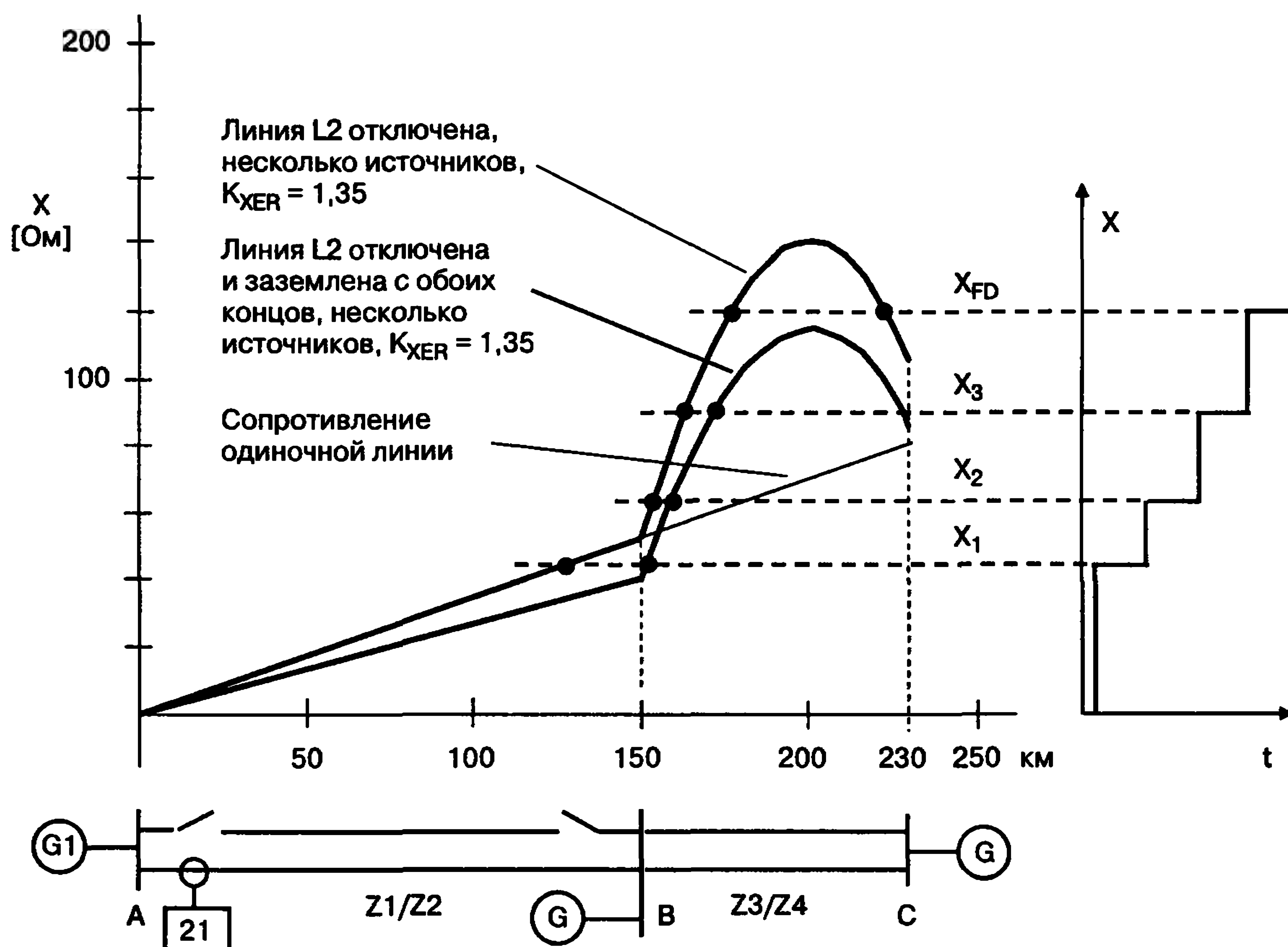


Рис. 7.6. Зона действия защиты при замыканиях на землю (пример расчета)

Отсюда максимальное значение переходного сопротивления, охватываемое характеристикой, должно быть

$R_{max} = 0{,}7 \cdot 309/2 = 108$ Ом [первичных].

Уставка $R/X = 1$ ($R = 50$ Ом) для линии длиной 150 км и $R/X = 2$ ($R = 50$ Ом) для линии длиной 80 км вполне достаточна для первой ступени.

В таком случае можно установить зону блокирования нагрузки (см. п.п. 6.2.6), соответствующую $R = 50$ Ом, и угол $\varphi_A = 30 - 50°$ в зависимости от реактивной нагрузки, передаваемой по линии. Охват в направлении R для резервных ступеней может быть увеличен за счет поддержания отношения $R/X = 1$ для линии 150 км и $R/X = 2$ для линии 80 км.

Выводы

Рассмотрен пример показывает, что селективная удаленная резервная защита неосуществима в системах с магистральными линиями электропередачи с изменяющимися режимами и условиями, определяемыми многочисленными мощными источниками.

При нормальной параллельной работе линий резервные ступени дистанционных защит охватывают только маленькую долю длины следующих линий из-за необходимости обеспечения селективности действия на одиночной линии, когда достигается самый большой охват. Потеря оставшейся одиночной линии может оказаться опасной. Поэтому следует использовать две системы основных защит (например, PUTT и POTT или PUTT и дифференциальная защита) в сочетании с местным резервированием (УРОВ). Дополнительное дальнее резервирование дистанционных зон должно быть оптимизировано в максимально возможной степени. Для расширения областей действия РЗ используется, когда это возможно установка более высокого поправочного коэффициента, учитывающего неодинаковость сопротивлений прямой и нулевой последовательностей ВЛ. Значение $k_{XER\text{-}2} = k_{XEL} + k_{XEM}$ допустимо. В этом случае обеспечена такая же зона действия, что и при компенсации параллельной линии.

Компенсация влияния параллельных линий не нужна по условиям работы защиты. Зона действия уменьшается незначительно. Критический случай будет при условии одиночного источника питания, что маловероятно при наличии нескольких источников.

Достаточная область действия основной ступени с полным охватом и резервных зон может быть гарантирована использованием индивидуального поправочного коэффициента, как упоминалось выше.

Компенсацию влияния параллельных линий следует, однако, рассматривать при определении места повреждения, потому что только таким образом можно точно определить расстояние до места повреждения.

Тема определения зон действия защиты на двухцепных линиях в системах с заземленной нейтралью подробно рассматривается в [3.34]. На сегодняшний день имеются программы расчета для относительно сложных проверок зон резервирования и фиксации повреждений.

7.2. Трехконцевые линии (Т-образные фидеры)

На Т-образных линиях (см., нпример, рис. 7.7) источник питания на 3-ем конце в достаточной степени влияет на область

действия защиты. Это является определяющим критерием при выборе принципа работы защиты и уставок ступеней.

Защита без каналов связи

Селективное отключение замыканий с выдержкой времени меньшей, чем выдержка времени второй ступени, практически невозможно. Вторая ступень должна иметь область действия, охватывающую наиболее длинный после узла участок, с учётом эффекта промежуточной подпитки. Причём, если один из источников отключен, то зона излишнего охвата становится огромной.

Если при близких КЗ допустимо каскадное (последовательное) отключение выключателей на концах линии, то возможно некоторое уменьшение уставок. В этом случае уставка второй ступени должна определяться по «Формуле 2».

$$X_2 = X_{L\,(\text{от данной подстанции до узла})} + 2 \times X_{L\,(\text{от узла до наиболее удалённого конца})} \quad (7.13)$$

Такая уставка гарантирует то, что, по крайней мере, одна из защит «увидит удаленное замыкание» во второй зоне и отключит его. Затем замыкание «увидит» защита на другом конце и также произведёт отключение, т. к. промежуточный источник питания отключен.

Защита с каналами связи

Наиболее простой случай возникает, если все 3 участка линии имеют приблизительно одну длину. В этом случае на каждом питающем конце возможна установка ступени с неполным охватом зоны, действующей при повреждениях на своем участке и за узлом. Все внутренние замыкания будут определяться, по крайней мере, одной из ступеней с неполным охватом, а выключатели на противоположных концах будут отключаться разрешающим сигналом.

Если используется схема с разрешающим сигналом и зонным расширением, то необходимо обеспечить, чтобы область действия ступени с полным охватом включала в себя участки, расположенные за обеими противоположными подстанциями даже в наихудшем случае промежуточной подпитки (см. п.п. 3.5.2).

При неблагоприятных условиях лучше всего использовать схему с передачей разрешающего сигнала в сочетании с пусковой ступенью, т. к. область действия в этом случае получается максимальной.

В крайних случаях, когда срабатывание защиты при замыканиях, близких к противоположному концу, не гарантировано, необходимо использование функции прямого внутреннего отключения по выделенному каналу связи.

Вне зависимости от того, какая схема отключения используется, все станции должны быть связаны между собой отдельными каналами связи.

В общем случае секции линии имеют разную длину, а источники питания отличаются друг от друга в большей или меньшей степени. Схема с передачей разрешающего сигнала для ступени с неполным охватом не может быть использована в этом случае, т. к. область действия, по крайней мере, одной из первых ступеней защит не распространяется на участок линии за узлом. В этом случае необходимо использование схемы со сравнением направлений, либо схемы с блокирующими сигналами.

Логическая схема связи в этом случае значительно усложняется.

Схема с передачей разрешающего сигнала для ступени с излишним охватом для трёхконцевой линии изображена на рис. 5.4, п.п. 5.3.2.6. Получаемые сигналы должны быть поданы на вход схемы «И» (последовательное соединение контак-

тов). Полученный сигнал должен быть отправлен обратно на передающий конец, если выключатель отключен, либо при слабом источнике питания (защита не срабатывает) для того, чтобы обеспечить отключение на этом конце.

Цифровые реле 7SA позволяют непосредственно воздействовать на собственный выключатель и одновременно проводить измерения ступенью с неполным охватом. Это имеет значение, если реле на противоположных концах не срабатывают при близких замыканиях из-за большого активного сопротивления в точке замыкания, т. к. сопротивление увеличивается при уменьшении тока замыкания (см. п.п. 3.5.1 и следующий пример). После отключения конца, который находится ближе всего к месту замыкания, измеряемое на других концах активное сопротивление уменьшается, что позволяет схеме с передачей разрешающего сигнала для ступени с излишним охватом отключить 2 оставшиеся линии.

Независимая ступень с неполным охватом также может оказаться полезной, если при внутреннем замыкании ток вытекает из Т-образной линии по условиям работы системы («условия утечки», см. п.п. 3.5.2). Прямое отключение конца, ближайшего к месту замыкания, приводит к развитию нового сценария замыкания (реверс или прекращение протекания тока, вытекающего из рассматриваемой линии), которое схемой с передачей разрешающего сигнала для ступени с полным охватом рассматривается как внутреннее. Снова происходит каскадное отключение.

Схемы с блокировкой, часто используемые за пределами Европы, имеют преимущество на трёхконцевых линиях, которое заключается в том, что в них используется амплитудно-модулированный PLC сигнал одной частоты. Поэтому на каждом конце линии требуется только один передатчик и один приёмник. При выборе уставок зон производятся те же действия, что и для схемы с передачей разрешающего сигнала для ступени с излишним охватом.

Пример.

Расчет уставок ступеней для трехконцевой линии.

Дано:

Трехконцевая линия напряжением 110кВ, схема приведена на рис. 7.7.

Данные линии (одинаковы для всех участков):

$R'_{L1} = 0{,}071$ Ом/км и $X'_{L1} = 0{,}380$ Ом/км;

$R'_{L0} = 0{,}220$ Ом/км и $X'_{L0} = 1{,}110$ Ом/км.

Эффективное сопротивление заземления опоры: 5 Ом.

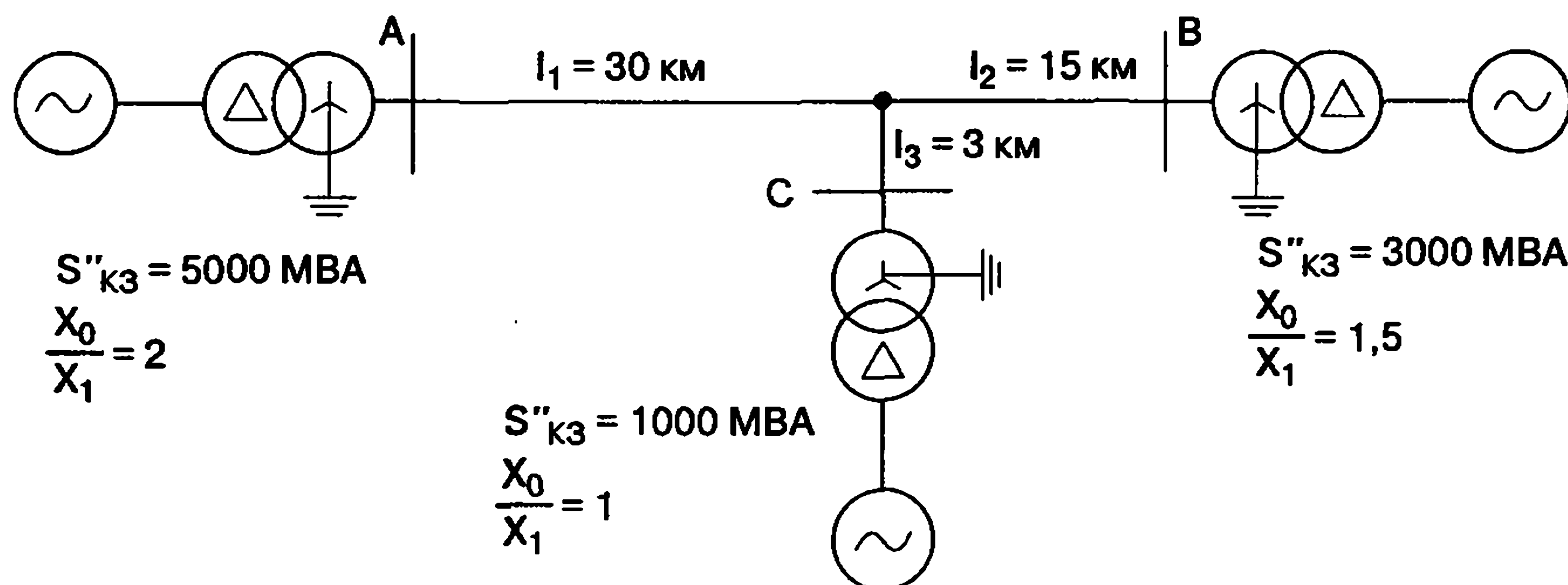


Рис. 7.7. Линия с трехсторонним питанием (трехконцевая): исходные данные для примера расчета

Максимальный кратковременно допустимый ток линии:

$I_{L\text{-max}} = 2I_{L\text{-термич}} = 2 \cdot 630 = 1260$ А.

Трансформатор тока: 600/1.

Трансформатор напряжения: 110/0,1 кВ.

Предусмотрены каналы связи.

Задание.

Определить уставки пускового органа и ступеней защиты.

Решение.

Сначала рассматриваются междуфазные КЗ и определяются зоны действия в направлении *X*.

Ступени с неполным охватом

Уставки ступеней с неполным охватом в направлении оси *X* выбираются (отстраиваются) относительно ближайшего противоположного конца без учёта промежуточной подпитки:

$X1A_A = 0{,}85(11{,}4 + 1{,}14) = 10{,}7$ Ом;

$X1A_B = 0{,}85(5{,}7 + 1{,}14) = 5{,}8$ Ом;

$X1A_C = 0{,}85(1{,}14 + 5{,}7) = 5{,}8$ Ом.

Уставка R1 в 2 раза превышает реактивное сопротивление линии ($R/X = 2$).

Полученные результаты показывают, что область действия ступени $X1A_A$ не достигает узла, а ступень $X1A_B$ лишь слегка его охватывает. Поэтому схема с передачей разрешающего сигнала для ступени с неполным охватом не может быть использована. В этом случае используется схема с передачей разрешающего сигнала для ступени с полным охватом.

Ступени с излишним охватом для POR схемы

При определении области действия ступеней с полным охватом необходимо учитывать влияния источников промежуточной подпитки. На практике рассматриваются следующие режимы:

на собственном конце минимальная мощность КЗ;

на других концах максимальная мощность КЗ.

В примере, для упрощения, мощности КЗ принимаются неизмеными.

Рассматриваем реле на подстанции B.

Токи КЗ и напряжения, указанные на рис. 7.8, рассчитаны для замыкания в конце линии А.

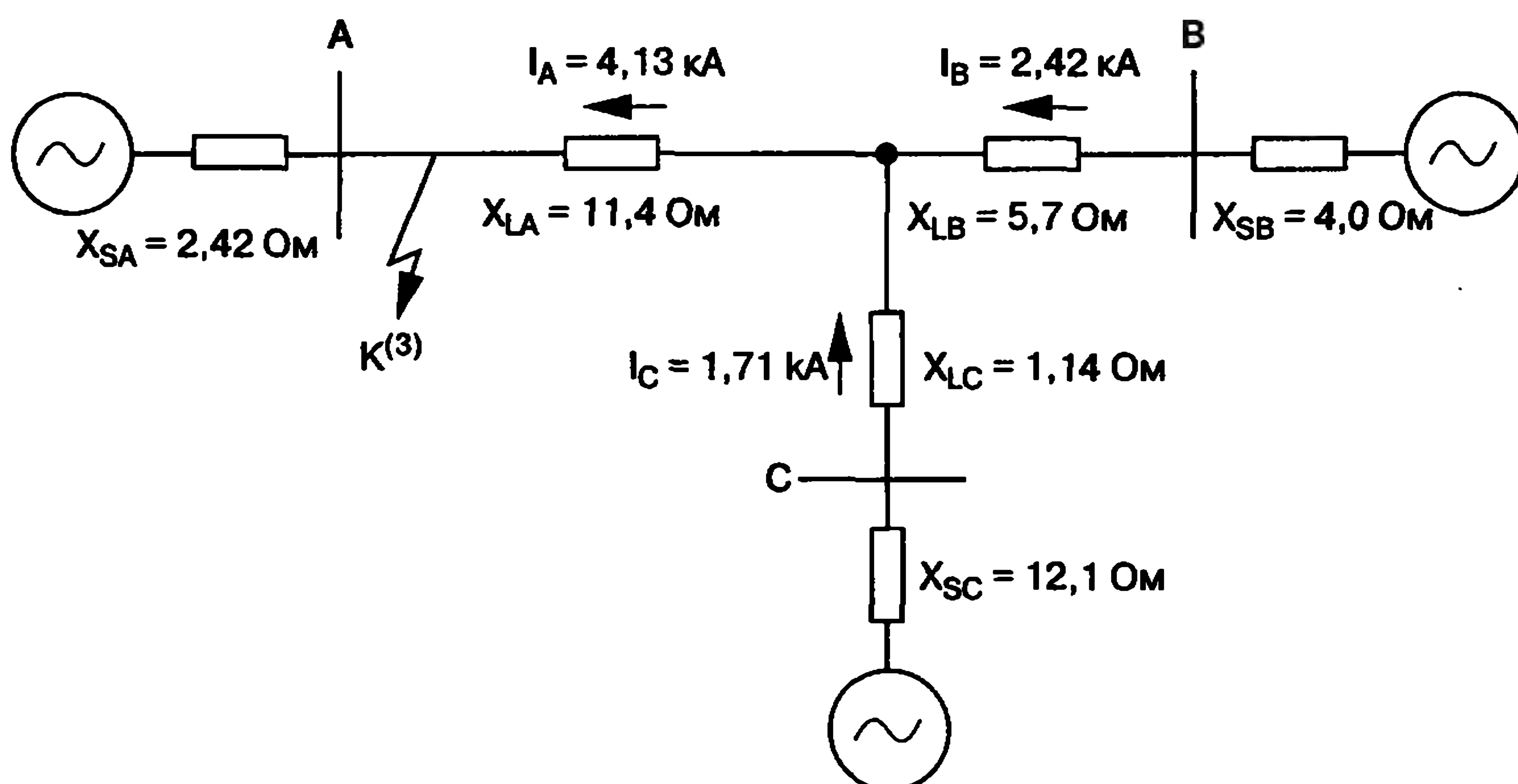


Рис. 7.8. Пример расчета линии с трехсторонним питанием: распределение токов при трехфазном замыкании на шинах А

Для приблизительных расчётов учитывались только реактивные сопротивления линий и источников.

Уставка ступени с полным охватом рассчитывается следующим образом:

$$X1A_B = 1{,}2\left(X_{LB} + X_{LA}\cdot\frac{I_C}{I_B}\right) =$$

$$= 1{,}2\left(5{,}7 + 11{,}4\cdot\frac{1{,}71}{2{,}42}\right) = 25{,}2\ \text{Ом}.$$

При замыкании в точке C реактивное сопротивление оказывается меньше (читатель может проверить).

Из-за большей длины зоны выбираем $R1B_B = X1B_B = 25{,}2$ Ом.



Рис. 7.9. Т-образная линия: расчет замыкания на землю с активным сопротивлением методом симметричных составляющих

Минимальное сопротивление нагрузки:

$$Z_{\text{нагр.-min}} = \frac{U_{\text{ном}}/\sqrt{3}}{I_{\text{нагр.max}}} = \frac{110/\sqrt{3}}{1,26} = 50\ \text{Ом}.$$

При этом обеспечивается достаточно большой запас.

Замыкания на землю

Наиболее неблагоприятные условия возникают при замыкании в точке А, так как на шинах подстанции А мощность КЗ максимальна.

Рассматривается сопротивление, измеряемое в точке В (расчёт для точки С предлагается провести читателю).

Эквивалентная комплексная схема замещения для расчета КЗ методом симметричных составляющих представлена на рис. 7.9.

Большой ток короткого замыкания от шин А вызывает очень большое падение напряжения на активном переходном сопротивлении в месте замыкания. Угол между ЭДС источника и током КЗ равен 30° из-за маленького сопротивления источника на шинах А. Угол сопротивления КЗ в месте установки реле получается ещё меньше — 27,3° (рис. 7.10).

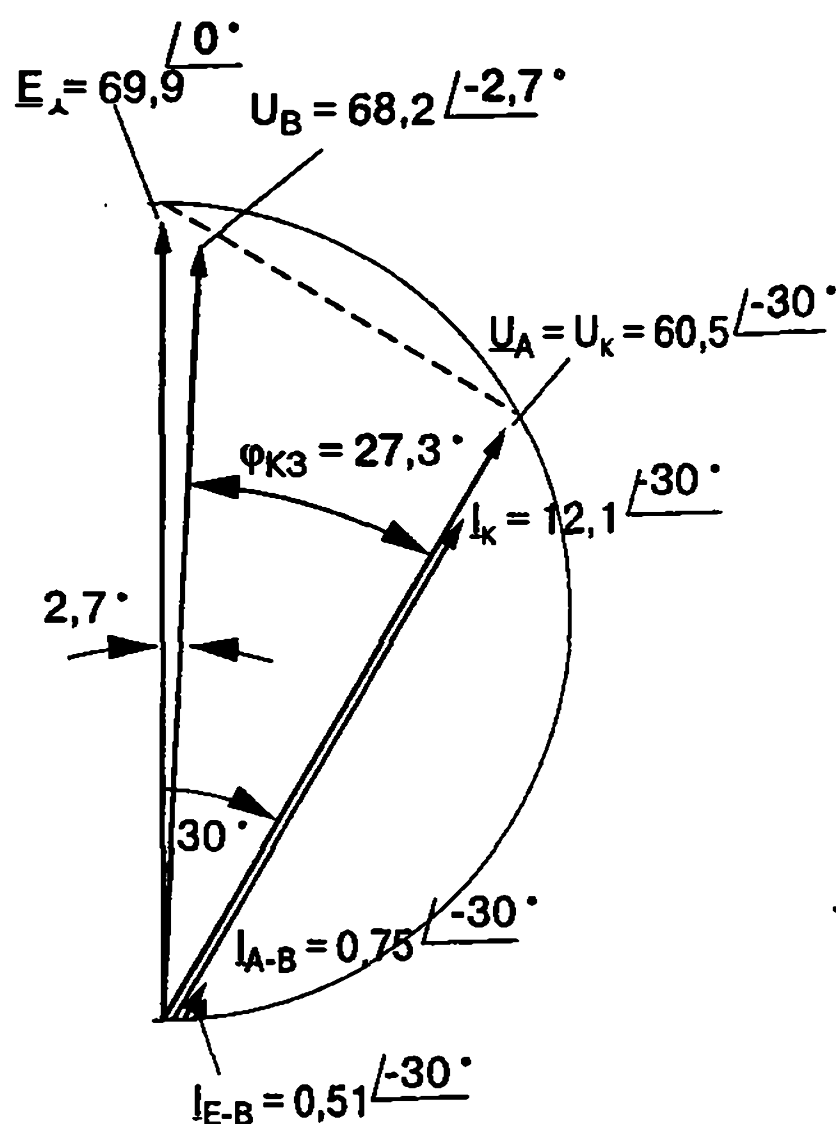
Ток КЗ в месте установки защиты В, как и ожидалось, получается значительно меньше.

Поскольку токи I_ϕ и I_E имеют одинаковую фазу, для расчёта измеряемых значений X и R можно использовать упрощённые выражения (3.54) и (3.55) из п.п. 3.2.3:

$$(X_{A-E})_B = \frac{U_{\phi\text{-}E} \cdot \sin\varphi_{K3}}{I_\phi + \frac{X_E}{X_L} \cdot I_E} =$$

$$= \frac{68,2 \cdot \sin 27,3^\circ}{0,75 + 0,63 \cdot 0,51} = 29,2\ \text{Ом};$$

$$(R_{A-E})_B = \frac{U_{\phi\text{-}E} \cdot \cos\varphi_{K3}}{I_\phi + \frac{R_E}{R_L} \cdot I_E} =$$



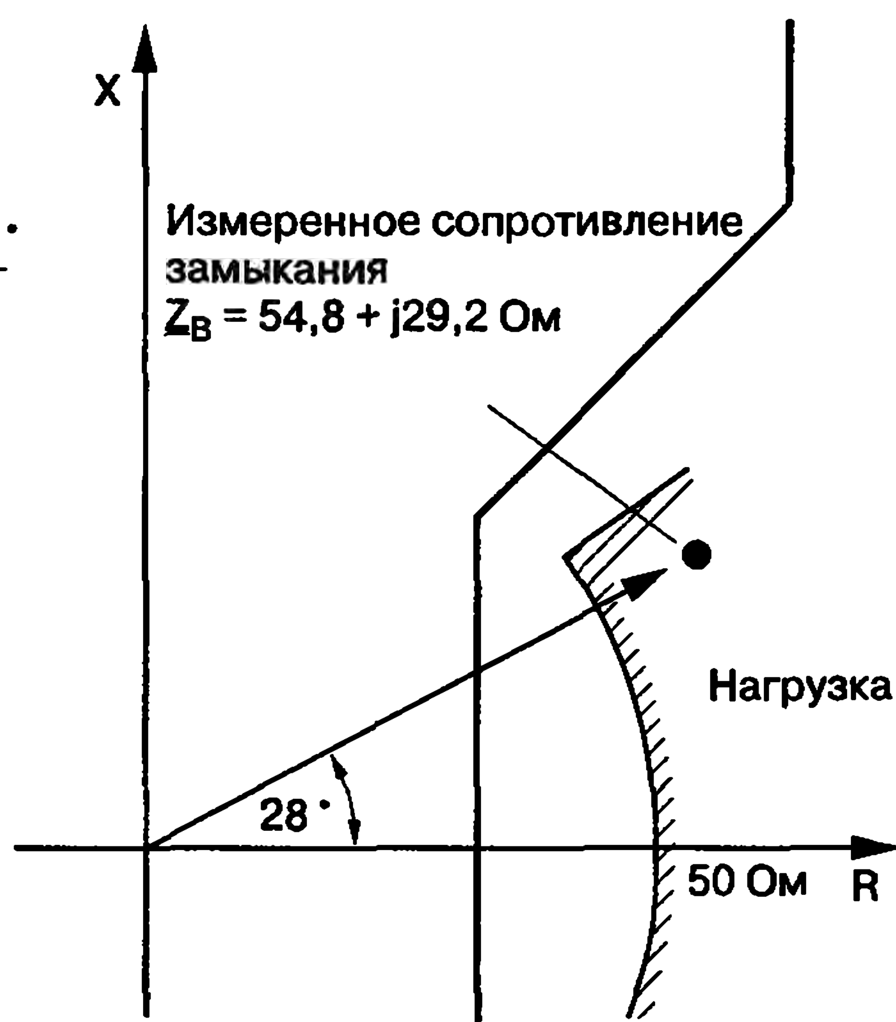


Рис. 7.10. Линия с трехсторонним питанием (см. рис. 7.9): диаграмма токов, напряжений и сопротивлений

$$= \frac{68{,}2 \cdot \cos 27{,}3^\circ}{0{,}75 + 0{,}70 \cdot 0{,}51} = 54{,}8 \text{ Ом}.$$

Необходимо заметить, что активное сопротивление по значению очень близко к минимальной нагрузке линии.

Поэтому срабатывание пускового органа защиты при таком замыкании не может быть гарантировано. Из-за маленького угла короткого замыкания направленный пусковой орган также не сработает, т. к. его уставка не может быть меньше 30° по условию передачи реактивной мощности.

Ступень с неполным охватом, установленная в точке А и предназначенная для прямого отключения, позволяет решить эту проблему. Она измеряет небольшое активное сопротивление из-за большого тока КЗ и поэтому обеспечивает отключение выключателя на линии со стороны шин А:

$(X_{A-E})_{\text{A}} = 0;$

$$(R_{A-E})_{\text{A}} = \frac{U_{\text{ф-}E} \cdot \cos\varphi_{\text{КЗ}}}{I_{\text{ф}} + \dfrac{R_E}{R_L} \cdot I_E} =$$

$$= \frac{60{,}5 \cdot \cos 0^\circ}{10{,}69 + 0{,}70 \cdot 10{,}88} = 3{,}3 \text{ Ом}.$$

После отключения источника на шинах А возникают условия, которые проиллюстрированы на рис. 7.11. Ток КЗ вблизи шин В и С практически удваивается, а угол короткого замыкания увеличивается приблизительно до 79° (в действительности меньше приблизительно на 10°, так как в расчёте не учитывалось активное сопротивление линии).

Направленный комбинированный пуск или пуск по сопротивлению с уставкой по углу, равной 45°, обеспечат срабатывание.

Пуска по току или комбинированного пуска по отдельности будет недостаточно.

После отключения выключателя у шин А защита, установленная со стороны шин В, будет измерять следующие сопротивления:

$$(X_{\text{ф}-E})_{\text{В}} = \frac{U_{\text{ф-}E} \cdot \sin\varphi_{\text{КЗ}}}{I_{\text{ф}} + \dfrac{X_E}{X_L} \cdot I_E} =$$

$$= \frac{62{,}7 \cdot \sin 77{,}7^\circ}{1{,}41 + 0{,}63 \cdot 1{,}13} = 29{,}0 \text{ Ом};$$

$$(R_{\text{ф}-E})_{\text{В}} = \frac{U_{\text{ф-}E} \cdot \cos\varphi_{\text{КЗ}}}{I_{\text{ф}} + \dfrac{R_E}{R_L} \cdot I_E} =$$

$$= \frac{62{,}7 \cdot \cos 77{,}7^\circ}{1{,}41 + 0{,}70 \cdot 1{,}13} = 6{,}1 \text{ Ом}.$$

Как и ожидалось, активное сопротивление значительно уменьшилось и стало намного меньше уставки ступени.

Активное сопротивление дуги

В предыдущих расчётах мы не учитывали сопротивление дуги. Оценим его влияние.

Предположим, что длина изолятора равна 1,3 м, с учетом запаса в 50 % можно определить напряжение на дуге.

$U_{\text{дуги}} = 1{,}5 \cdot 1{,}3 \cdot 2{,}5 = 5$ кВ.

При включенном источнике питания со стороны шин А напряжение на постоянном сопротивлении в месте КЗ: $U_K =$ $= 12{,}1$ кА · 5 Ом = 60,5 кВ. Это означает, что влияние постоянного сопротивления дуги менее 10 %.

После отключения источника со стороны А напряжение на постоянном сопротивлении уменьшается до $U_K = 2{,}68$ кА × × 5 Ом = 13,4 кВ. Напряжение дуги остаётся постоянным, возрастая до 37 % относительно U_K.

Так как уставка ступени дистанционной защиты имеет большое значение, то в данном случае влияние сопротивления дуги мало по сравнению с влиянием постоянного сопротивления (сопротивление за-

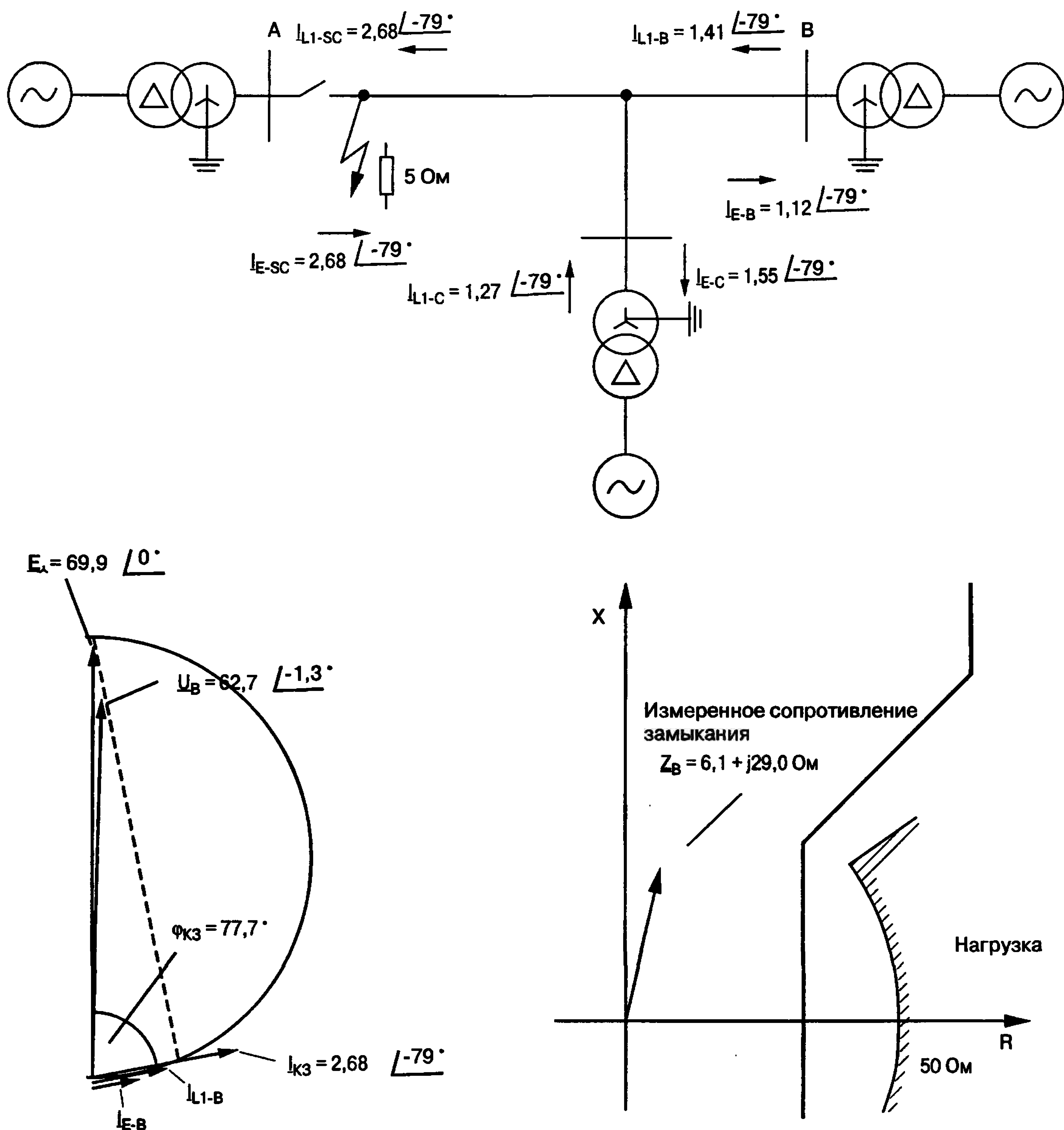


Рис. 7.11. Линия с трехсторонним питанием: замыкание на землю с активным переходным сопротивлением при отключении источника A

земления опоры). Это можно учесть увеличением области действия на 10 %.

Замечание

На этом примере хорошо видно, что сопротивление дуги можно не учитывать постоянным сопротивлением, так как при этом реле будет измерено нереально большое значение активного сопротивления, если источник на противоположном конце включен. Более того, очевидно, что при учёте постоянных сопротивлений в

месте КЗ уставка по оси R дистанционной ступени получится очень большой, если на противоположном конце находится мощный источник питания. Выбор уставок усложняется, если необходимо учитывать ограничивающее влияние заземляющих проводов (см. п.п. 3.5.1).

Резервные ступени

В нашем примере область действия второй ступени должна в любом случае охватывать шины противоположного конца для обеспечения резервирования защиты шин. Её уставку необходимо выбирать по «формуле 2».

Тогда для защиты, установленной на стороне шин В, получим следующие результаты:

$X2_В = X_{дуги} + 2X_{LA} = 57 + 2 \cdot 11{,}4 = 28{,}5$ Ом.

Третьи ступени не рассматриваются в данном примере. Их уставки необходимо выбирать в соответствии с параметрами соседних сетей и параметрами защит, установленных там.

Пусковой орган

Уставка ПО должна обеспечить максимально возможную чувствительность для того, чтобы как можно большая часть сети входила в область пуска и резервная защита осуществлялась, несмотря на влияние промежуточной подпитки.

Направленный пуск

$U(I>) = 0{,}7U_{ном}$ и $I> = 0{,}25I_{номТТ} = 150$ А.

$U(I>>) = 1{,}0U_{ном}$ и $I> = 1{,}2 \cdot 2I_{L\text{-терм}} =$
$= 1{,}2 \cdot 1260 = 1500$ А.

$U(I\varphi>) = 1{,}0U_{ном}$ и $I\varphi> = 0{,}7I_{L\text{-терм}} =$
$= 0{,}8 \cdot 630 = 500$ А.

$\varphi_A = 35°$, т. е. немного больше максимально допустимого угла нагрузки.

$I_E> = 0{,}25I_{номТТ} = 150$ А.

$U_E>$ соответствует напряжению смещения равному 20 % $U_{ном}/\sqrt{3}$.

Пуск по сопротивлению

Выбираем ту же чувствительность, что и для направленного пуска.

$$X_{+A} = \frac{U I\varphi>}{I\varphi>} = \frac{110/\sqrt{3}}{0{,}5} = 127 \text{ Ом}$$

$$X_{-A} = X_{+A} = 127 \text{ Ом}$$

$$R_{A1} = R_{A1E} = 0{,}8 \cdot Z_{нагр\text{-}min} = 0{,}8 \cdot 50 = 40 \text{ Ом}$$

8. Ввод в действие

Ввод в действие системы защиты должен быть произведён квалифицированным персоналом с соответствующим уровнем подготовки.

Система защиты должна быть полностью проверена и настроена ещё до первого включения линии. После включения линии необходимо произвести проверку током нагрузки.

8.1. Тестирование системы защиты

Система защиты состоит из следующих частей:

- Устройство защиты.

При использовании аналоговой техники оно состояло из набора защит и вспомогательных приборов, установленных на панели, либо в шкафу защиты, либо в низковольтном отсеке на панели привода выключателя; обычно поставляется предварительно протестированным.

При использовании цифровой техники устройство защиты выполняется в виде одного многофункционального реле, протестированного производителем.

- Трансформаторы тока и напряжения.
- Выключатели.
- Аккумуляторные батареи.
- Цепи отключения и включения.
- Цепи сигнализации.
- Последовательное соединение с системой SCADA.
- Каналы связи защиты с противоположной станцией.

В сетях высокого напряжения используются избыточные комплекты защиты с гальванически разделенными измерительными входами и цепями управления.

Тестирование системы защиты состоит из следующих шагов:

- Параметрирование устройства защиты.

Для этой цели используется программа DIGSI. Обычно все уставки задаются и хранятся в DIGSI файле, который создаётся специалистом в области релейной защиты перед ее поставкой. Непосредственно на месте эти уставки могут быть загружены в реле обслуживающим персоналом.

- Проверка уставок срабатывания.

Тестовые сигналы генерируются во вторичных цепях и подаются на вход реле. Оборудование для проведения тестов подключается через шину терминала к устройству защиты (панели или шкафу) или через тестовый выключатель, предназначенный специально для этой цели. Для тестирования цифровой дистанционной защиты рекомендуется использование трёхфазного источника тока и напряжения, так как эти современные реле используют напряжения неповреждённых фаз для определения направления и выполняют постоянный контроль симметрии токов и напряжений.

Должны быть проверены все уставки по току и напряжению. Для дистанционной защиты проводится проверка уставок по осям R и X и выдержек времени для всех ступеней и всех видов КЗ (одно-, двух- и трехфазных).

Управляемое компьютером оборудование для тестирования защиты точно имитирует все виды повреждения и позволяет автоматизировать процесс тестирования (рис. 8.1) [8.1].

- Тестирование цепей измерительных трансформаторов.

Проверка цепей измерительных трансформаторов тока проводится при подаче тестовых сигналов в первичные цепи. Вторичные токи, поступающие на входы реле, могут быть непосредственно отображены на дисплее при помощи измери-

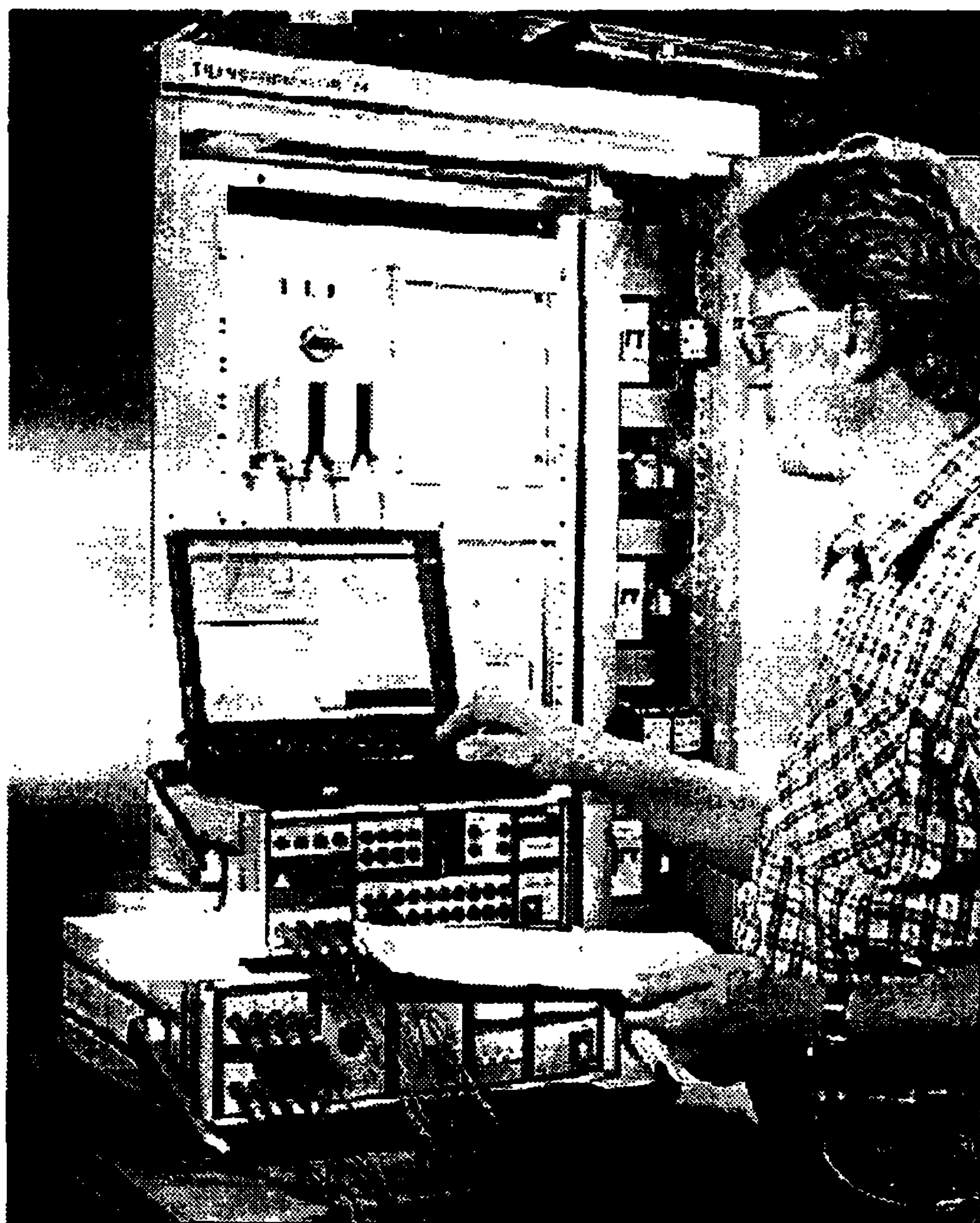


Рис. 8.1. Проверка дистанционной защиты с помощью тестового оборудования, управляемого ПК

тельной интегрированной функции, включенной в цифровые реле.

Цепи ТН проверяются со стороны вторичных выводов ТН.

- Цепи управления выключателем, а также цепи сигнализации и последовательные интерфейсы проверяются срабатыванием (выполнением) соответствующей функции реле при подаче необходимых сигналов во вторичные цепи.
- Выключатель.

При разомкнутых разъединителях срабатывание защиты и функция АПВ проверяются имитацией замыкания при помощи оборудования для проведения тестов во вторичных цепях.

- Тестирование системы телезащиты.

В этом случае при проведении тестов необходимо два комплекта оборудования для имитации внутренних и внешних замыканий на обоих концах линии. Для синхронизации работы необходимы дополнительные каналы связи. Включением линии с одной стороны и запуском тестового оборудования по появившемуся напряжению можно получить синхронное включение тестового оборудования.

Современные вторичные электронные устройства для проведения проверок позволяют осуществить синхронный запуск с помощью спутниковой связи с точностью до 10 мкс [8.2]. Тогда возможно проведение синхронных проверок по всей длине линии током и напряжением, близким к реальным.

Для повышения безопасности пусковой орган имеет чувствительную уставку и производит отключение без выдержки времени.

8.2. Тестирование под нагрузкой

После успешного тестирования системы защиты линия может быть включена в работу с соблюдением необходимых мер безопасности. Рекомендуется сбрасывать выдержки времени резервных ступеней перед и во время проведения тестов для обеспечения мгновенного отключения при возникновении КЗ.

При токах нагрузки, составляющих не менее 10 % от номинального, возможно проведение тестирования всей измерительной цепи сравнением измеренных рабочих значений с известными данными о распределении нагрузки.

Проверка направлений

Этот тест является очень важным, так как он позволяет проверить правильность определения направления дистанционной защитой, т. е. того, что замыкание, находящееся в прямом направлении действительно, определяется как находящееся в прямом на-

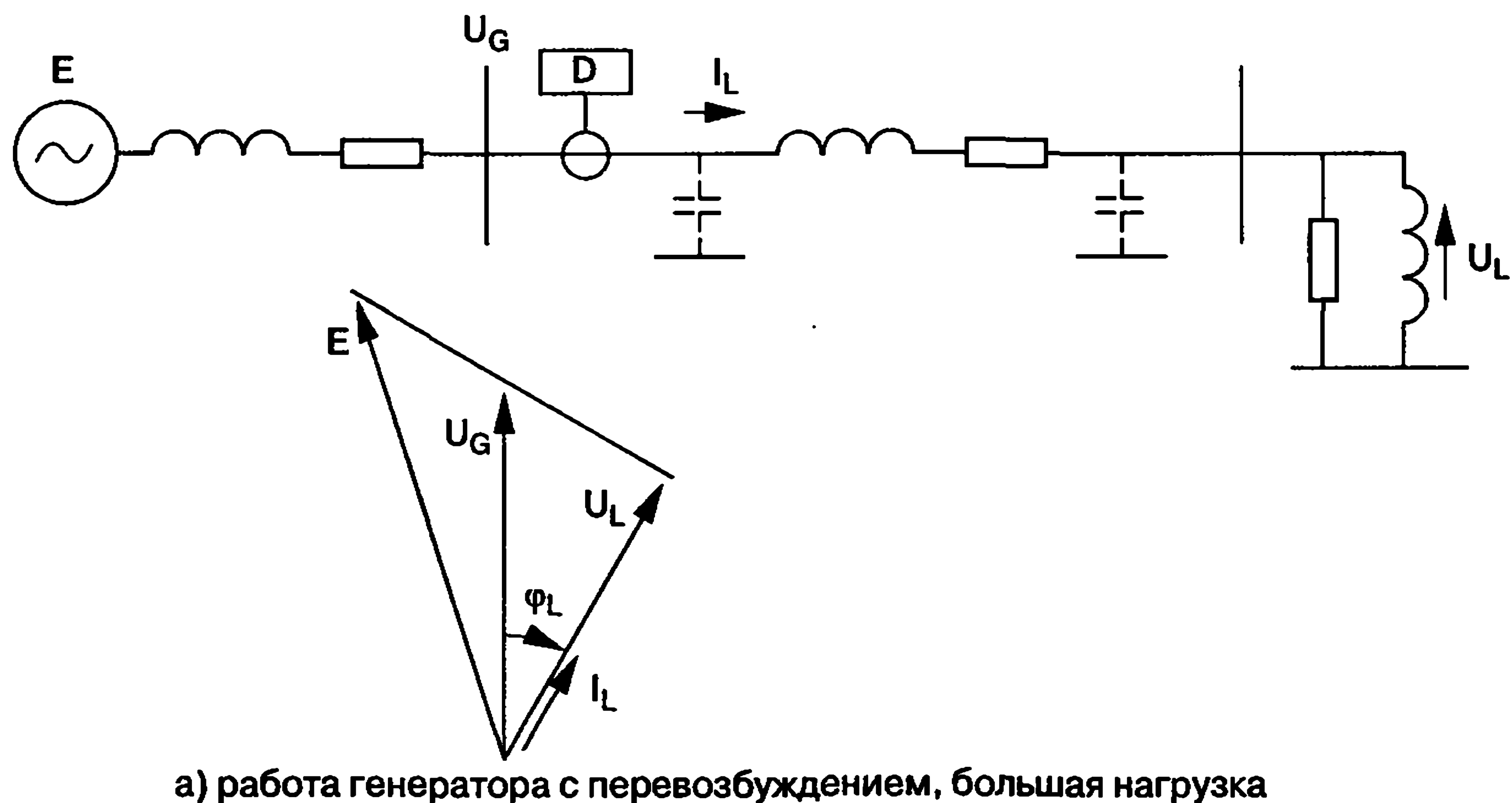
правлении. Использование первичных токов и напряжений при проведении этого теста обеспечивает правильное распознавание изменения полярности в цепях ТТ и ТН.

Активная и реактивная составляющие мощности, передаваемой по линии, определяют сопротивление, измеряемое реле, по которому определяется направление. Рассчитывается это следующим образом:

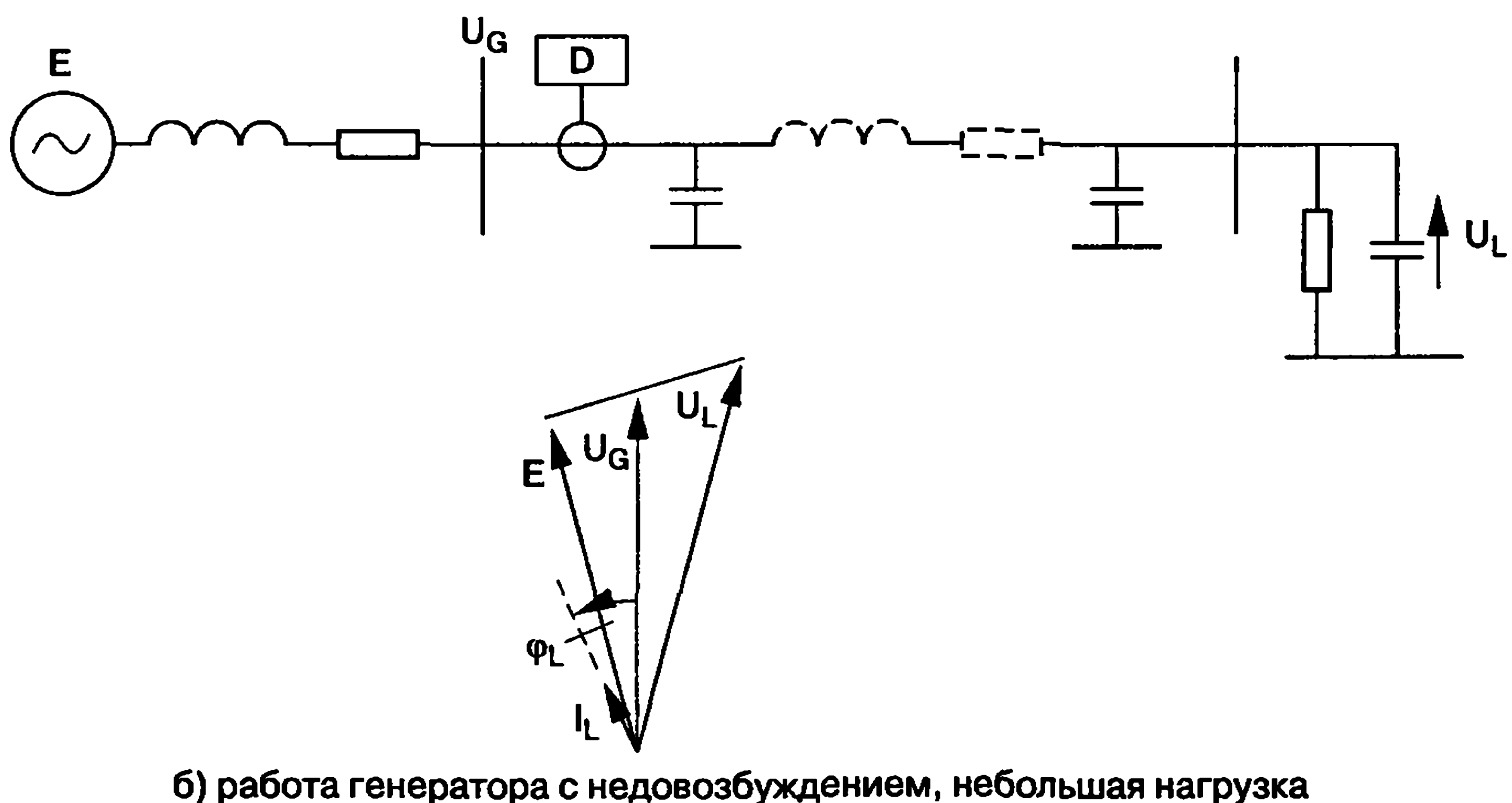
$$Z_{нагр} = \frac{P}{I^2_{нагр}} + j\frac{Q}{I^2_{нагр}} = R_L + jX_L. \qquad (8.1)$$

Активная мощность, направленная от шин в линию, считается положительной. Это соответствует случаю, когда потребитель находится в конце линии. Реактивная мощность считается положительной, если индуктивная мощность направлена от шин в линию, т. е. когда сопротивление линии является индуктивным. Генератор, работающий с перевозбуждением, является источником реактивной мощности, тогда как генератор, работающий с недовозбуждением, её потребителем (рис. 8.2).

В случае слабо нагруженной линии или сети преобладает емкостная нагрузка, т. е. измеряемая реактивная мощность от-



а) работа генератора с перевозбуждением, большая нагрузка



б) работа генератора с недовозбуждением, небольшая нагрузка

Рис. 8.2. Источник питания в сети; влияние нагрузки на угол между током и напряжением на реле

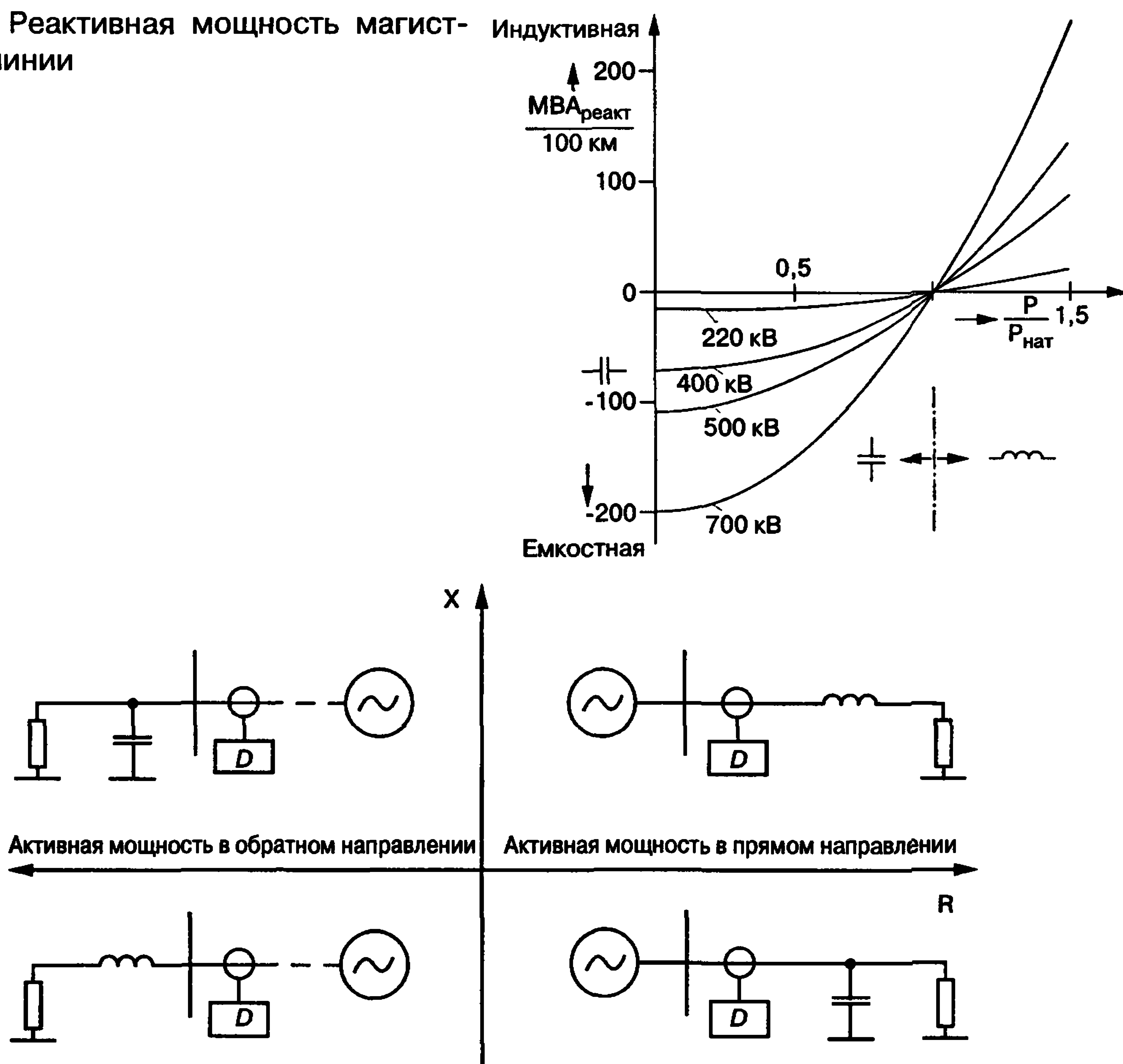


Рис. 8.3. Реактивная мощность магистральной линии

Рис. 8.4. Проверка правильности определения направления (мощности) с помощью тока нагрузки, знак измеряемого сопротивления Z = R + jX

рицательная. На сильно нагруженных линиях преобладает индуктивная мощность, т. е. измеряемая реактивная мощность положительна. На рис. 8.3 представлена эта ситуация для длинных линий электропередачи. При натуральной нагрузке линии наблюдается баланс реактивной мощности и по линии передается только активная мощность. Соответственно защита измерит либо отрицательное, либо положительное значение *R*.

Значения R и X рассчитываются по выражению (8.1) и указываются на диаграмме сопротивлений (рис. 8.4). Сравнивая положение вектора этого сопротивления с положением направленной характеристики, легко понять, прямое или обратное направление должна определить защита в условиях такой нагрузки.

В результате проверки правильности определения направления, осуществляемой введением в реле соответствующих параметров, направление должно быть определено правильно для всех 6 контуров измерений. После успешного проведения проверки направления и итоговой проверки уставок, линия может быть введена в работу.

9. Техническое обслуживание

Благодаря наличию в цифровых защитах функции непрерывного самоконтроля подход к их техническому обслуживанию должен измениться. По сравнению с аналоговыми защитами количество текущих технических проверок можно существенно уменьшить. Предполагается проведение ремонтов и проверок только в случае срабатывания защиты или возникновения короткого замыкания.

9.1. Самодиагностика

Цифровая защита производит постоянный самоконтроль всех цепей, начиная от измерительных входов до реле управления. Наиболее важные функции контроля:

- Цепи измерений:
  - Сумма токов $|\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C - \underline{I}_E| < \Delta I_{max}$.
  - Сумма напряжений $|\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C - \underline{U}_E| < \Delta \underline{U}_{max}$.
  - Несимметрия токов $|I_{ф\text{-}max}|/|I_{ф\text{-}min}| < kI$.
  - Несимметрия напряжений $|U_{ф\text{-}max}|/|U_{ф\text{-}min}| < kU$.
  - Чередование фаз: U_A до U_B до U_C.
  - обрыв цепей напряжения: $U_{фф} < Umin$ при $I_ф > I_{min}$.
- Элементы устройства.
  - Аналого-цифровой преобразователь: преобразование и проверка фиксированного значения.
  - Процессор: watchdog.
  - Чипы памяти: циклы чтения/записи.
  - Переключение катушек реле: однополюсное переключение и проверка обратной связи.

Контакты реле управления не могут самодиагностироваться. Для их проверки предназначены функции тестирования отключения и АПВ. Они могут быть запущены на месте или через модем или телефонную линию.

9.2. Подход к техническому обслуживанию

Надёжность защиты значительно повысилась с появлением возможности самоконтроля. Порядок величины можно определить статистически (рис. 9.1). Параметр неготовности показывает, какое количество устройств в среднем (в про-

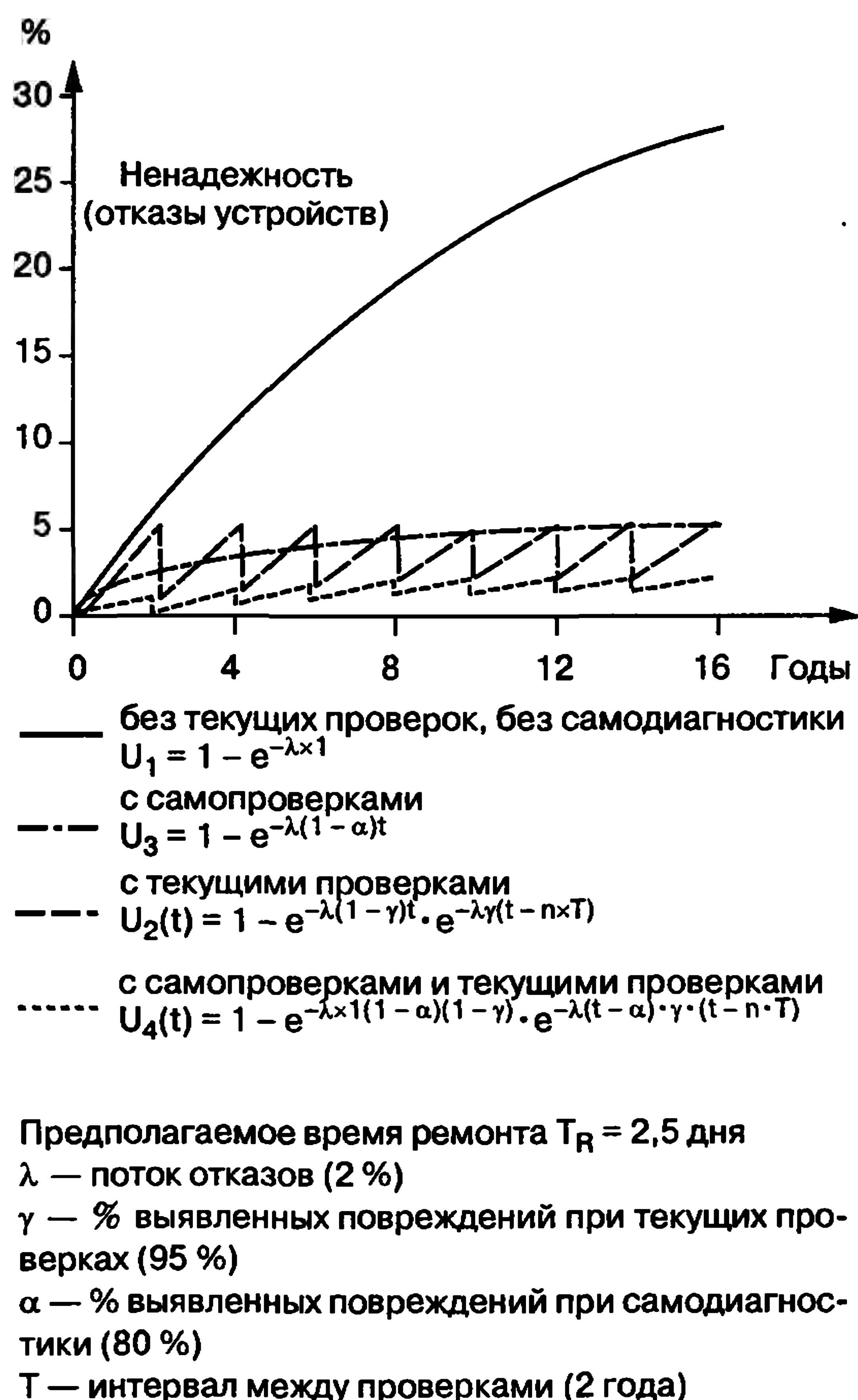


Рис. 9.1. Надежность защиты, влияние самодиагностике (значения в скобках даны в качестве примера)

центах от числа установленных) не функционирует в определённый момент времени. Без функции самоконтроля число отказавших приборов, естественно, резко увеличивается с течением времени эксплуатации. При постоянном самоконтроле процент отказавших приборов снижается до такого же уровня, как и при проведении текущих проверок.

На практике используется подход, сочетающий проведение текущих проверок через большие периоды времени с использованием функции самоконтроля.

В 1995г. рабочая группа «реле и технология защиты»VDEW (немецкий департамент пользователей) опубликовала следующие рекомендации по техническому обслуживанию цифровых реле [9.1]:

- Два раза в год простая проверка функций (без тестирования оборудования):

— сравнение оперативных измеренных значений (U, I, P, Q) реле с данными, полученными от независимой измерительной системы или от системного оператора;

— тест отключения (например, с тестом цикла АПВ);

— оценка записанных событий;

— проверка записей замыканий и сигналов телезащиты.

- Каждые 4 года тестирование защиты (с тестированием оборудования):

— проверка одного измеренного значения в каждом из входных каналов (*U* и *I*) и сравнение со значением на дисплее реле или ПК оператора;

— проверка всех используемых входов и выходов, включая цепи управления выключателем;

— оценка записанных событий или нарушений;

— проверка интерфейсов (ПК и SCADA подключение);

— считывание уставок защиты и сравнение с требуемыми значениями;

— проверка записей замыканий и сигналов телезащиты.

- Каждые 8 лет дополнительные динамические тесты уставок первой зоны:

— для всех типов замыканий (этой проверкой устанавливаются аппаратные изменения во входных фильтрах).

Таким образом, функция самоконтроля позволяет значительно снизить расходы на проведение текущих проверок цифровых устройств по сравнению с расходами на проведение текущих проверок аналоговых устройств.

Примечание. Опыт работы с цифровыми устройствами, использующими функцию самодиагностики, показывает, что тестирование защиты (с тестированием оборудования) можно проводить каждые 6 лет вместо установленных 4-х.

10. Приложение

П.1. Алгоритмы дистанционных измерений

П.1.1. Основные принципы

Контур повреждения определяется решением дифференциального уравнения первого порядка:

$$u_L(t) = R_L i_L(t) + L_L \frac{di_L(t)}{dt} \qquad (П.1.1)$$

Для определения неизвестных R_L и L_L необходимы 2 уравнения. Их получают измерением $u_L(t)$, $i_L(t)$ и $\frac{di_L(t)}{dt}$ за два последовательных момента времени, а затем подставляют эти значения в соответствующие уравнения:

$$u_L(t_1) = R_L i_L(t_1) + L_L \frac{di_L(t_1)}{dt} \qquad (П.1.2)$$

$$u_L(t_2) = R_L i_L(t_2) + L_L \frac{di_L(t_2)}{dt}. \qquad (П.1.3)$$

Решаем эту систему уравнений и получаем:

$$L_L = \frac{u_{L(1)} \cdot i_{L(2)} - u_{L(2)} \cdot i_{L(1)}}{\frac{di_{L(1)}}{dt} \cdot i_{L(2)} - \frac{di_{L(2)}}{dt} \cdot i_{L(1)}} \qquad (П.1.4)$$

$$R_L = \frac{u_{L(1)} \cdot \frac{di_{L(2)}}{dt} - u_{L(2)} \cdot \frac{di_{L(1)}}{dt}}{\frac{di_{L(1)}}{dt} \cdot i_{L(2)} - \frac{di_{L(2)}}{dt} \cdot i_{L(1)}}. \qquad (П.1.5)$$

Следует заметить, что значения R_L и L_L, полученные таким способом, не зависят от частоты. При построении ступенчатых диаграмм и выборе уставок защиты обычно используются выражения $X_L = = \omega_{ном} L_L = 2\pi f_{ном} L_L$, где $f_{ном}$ — номинальная частота системы.

На практике всегда появляются помехи и переходные колебания, которые не учитываются в R—L модели линии:

колебания зарядных токов линии или кабеля, обусловленные наличием ёмкостной связи между фазами и землей кабелей или длинных линий;

колебания с субгармонической частотой (последовательный резонанс) на линиях с последовательной компенсацией;

искажение измеряемых значений измерительными трансформаторами (например, из-за насыщения ТТ или колебаний в емкостных трансформаторах напряжения).

По этой причине требуется фильтрация измеренных сигналов.

В реле 7SA для этой цели используют нерекурсивные цифровые фильтры FIR (с конечной длительностью импульсной характеристики). Измерения выполняются путем оценки (обработки) n+1-замеров величин, полученных с шагом дискретизации Δt = 1мс на интервале наблюдения, равном $n \cdot \Delta t$.

Первый после возниконовения повреждения интервал наблюдения устанавливается коротким (5 мс для 7SA522) для обеспечения быстрого (меньше периода) отключения близких КЗ.

Затем, при сохранении повреждения, постепенно увеличивается ло полного периода (с новыми замерами) для обеспечения высокой точности при КЗ вблизи границы зоны действия.

Для этой цели используются фильтры Фурье. При дистанционных измерениях используют составляющие основной частоты.

Общие принципы цифровых защит рассмотрены в технической литературе [см. П1.1, П1.2, П1.3 и П1.4].

П.1.2. Алгоритм, основанный на использовании фильтров Фурье

Измеренные значения тока и напряжения преобразуют в векторные величины (соответствующие действительные и мнимые составляющие) с помощью ортогональных фильтров и затем рассчитывают сопротивления R и X.

Для нахождения векторов используют фильтры Фурье с интервалом интегрирования (интервалом наблюдения), равным одному периоду основной частоты. Активная и реактивная составляющие вектора тока КЗ основной частоты) определяются соотношениями:

$$\mathrm{Re}\{\underline{I}\} = \frac{1}{T_N} \cdot \int_{-\frac{T_N}{2}}^{+\frac{T_N}{2}} i(t) \cdot \cos(\omega_N \cdot y) dt \qquad (\text{П.1.6})$$

$$\mathrm{Im}\{\underline{I}\} = \frac{1}{T_N} \cdot \int_{-\frac{T_N}{2}}^{+\frac{T_N}{2}} i(t) \cdot \sin(\omega_N \cdot t) dt, \qquad (\text{П.1.7})$$

где $\omega_N = 2\pi \cdot f_N$ — основная частота (угловая), T_N — основной период (20 мс — при частоте 50 Гц).

Тогда комплексный ток:

$$\underline{I} = \mathrm{Re}\{\underline{I}\} + j\mathrm{Im}\{\underline{I}\} \qquad (\text{П.1.8})$$

Интервал наблюдения рассматривается от $t_A = -T_N/2$ до $t_E = +T_N/2$

Векторная величина $\underline{I}$ вычисляется в момент времени $t = t_0 + T_N/2$, если время возникновения повреждения (замыкания) обозначено как t_0, а интервал интегрирования при определении искомых величин составляет один период.

Время t соответствует фазовому углу $\varphi = \omega_N \cdot t$.

Таким образом, для вектора тока получаем:

$$\underline{I} = \underline{I} \cdot e^{j(\omega_N \cdot t + \varphi_1)} = I \cdot [\cos(\omega_N \cdot t + \varphi_I) + j\sin(\omega_N \cdot t + \varphi_I)] \qquad (\text{П.1.9})$$

Аналогичные формулы справедливы для расчета напряжения.

Расчет повторяют через определенные интервалы времени, т.е. каждую четверть периода (каждые 5мс при $f_N = 50$ Гц) с тем, чтобы получить значения векторных величин и полных сопротивлений для заданных моментов времени.

Дифференциальному уравнению для контура короткого замыкания:

$$u_L(t) = R_L \cdot i_L(t) + L_L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \qquad (\text{П.1.10})$$

соответствует уравнение для векторных величин в частотной области:

$$\underline{U_L} = R_L \cdot \underline{I_L} + jX_L \cdot \underline{I_L}$$

$$\text{где } X_L = \omega_N \cdot L_L = 2\pi \cdot f_N \cdot L_L \qquad (\text{П.1.11})$$

Расчет ведется только для основной частоты. Постоянная составляющая и наложенные гармоники отфильтровываются.

Уравнение (П.1-11) для вещественной и мнимой составляющих приобретает вид:

$$\mathrm{Re}\{\underline{U_L}\} + j\mathrm{Im}\{\underline{U_L}\} = (R_L + jX_L) \cdot (\mathrm{Re}\{\underline{Ir}\} + j\mathrm{Im}\{\underline{I_L}\}) \qquad (\text{П.1.12})$$

или

$$\mathrm{Re}\{\underline{U_L}\} + j\mathrm{Im}\{\underline{U_L}\} = R_L \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I_L}\} - X_L \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I_L}\} + j(X_L \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I_L}\} + R_L \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I_L}\})$$

Теперь уравнение можно решить независимо для вещественной и мнимой составляющих:

$$\mathrm{Re}\{\underline{U}_L\} = R_L \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_L\} - X_L \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_L\} \qquad (\text{П.1.13})$$

$$\mathrm{Im}\{\underline{U}_L\} = X_L \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_L\} + R_L \cdot \mathrm{In}\{\underline{I}_L\} \qquad (\text{П.1.14})$$

Имеем два уравнения для расчета R_L и X_L.

Решение:

$$X_L = \frac{\mathrm{Im}\{\underline{U}_L\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_L\} - \mathrm{Re}\{U_L\} \cdot \mathrm{Im}\{I_L\}}{\mathrm{Re}\{\underline{I}_L\}^2 + \mathrm{Im}\{I_L\}^2} \qquad (\text{П.1.15})$$

и

$$R_L = \frac{\mathrm{Re}\{\underline{U}_L\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_L\} - \mathrm{Im}\{U_L\} \cdot \mathrm{Im}\{I_L\}}{\mathrm{Re}\{\underline{I}_L\}^2 + \mathrm{Im}\{I_L\}^2} \qquad (\text{П.1.16})$$

Векторы тока и напряжения определяют по следующим формулам:

$$\underline{U}_L = U_L \cdot e^{j(\omega t + \varphi_U)} = U_L \cdot [\cos(\omega \cdot t + \varphi_U) + j\sin(\omega \cdot t + \varphi_U)] \qquad (\text{П.1.17})$$

$$\underline{I}_L = I_L \cdot e^{j(\omega t + \varphi_U)} = I_L \cdot [\cos(\omega \cdot t + \varphi_I) + j\sin(\omega \cdot t + \varphi_I)] \qquad (\text{П.1.18})$$

Если значения, полученные из формул (П.1.17) и (П.1.18) подставить в (П.1.15), получим:

$$X_L = \frac{U_L \cdot \sin(\omega t + \varphi_U) \cdot I_L \cdot \cos(\omega t + \varphi_I) -}{[I_L \cdot \cos(\omega t + \varphi_I)]^2 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{- U_L \cdot \cos(\omega t + \varphi_U) \cdot I_L \cdot \sin(\omega t + \varphi_I)}{+ [I_L \cdot \sin(\omega t + \varphi_I)]^2} \qquad (\text{П.1.19})$$

Применяя формулы суммы и разности тригонометрических функций, получаем:

$$X_L = \frac{U_L \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I)}{I_L} \qquad (\text{П.1.20})$$

$$R_L = \frac{U_L \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I)}{I_L} \qquad (\text{П.1.21})$$

Теперь можно использовать этот метод расчета для различных контуров повреждения.

Контур фаза-земля

Для контура фаза-земля справедлива следующая формула:

$$\underline{U}_{\Phi\text{-}E} = \underline{I}_\Phi \cdot R_L + j\underline{I}_\Phi \cdot X_L - \underline{I}_E \cdot \frac{R_E}{R_L} \cdot R_L -$$

$$- j\underline{I}_E \cdot \frac{X_E}{X_L} \cdot X_L \qquad (\text{П.1.22})$$

Вводим компенсированные токи:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_\Phi - \frac{R_E}{R_L}\underline{I}_E \text{ и } \underline{I}_X = \underline{I}_\Phi - \frac{X_E}{X_L} \cdot \underline{I}_E \qquad (\text{П.1.23})$$

где соотношения $R_E/R_L = k_{RE}$ и $X_E/X_L = k_{XE}$ соответствуют коэффициентам компенсации.

Выделение в (П.1-22) вещественной и мнимой частей дает два уравнения для неизвестных R_L и X_L:

$$\mathrm{Re}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} = \mathrm{Re}\{\underline{I}_R\} \cdot R_L - \mathrm{Im}\{\underline{I}_X\} \cdot X_L \qquad (\text{П.1.24})$$

и

$$\mathrm{Im}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} = \mathrm{Im}\{\underline{I}_R\} \cdot R_L + \mathrm{Re}\{\underline{I}_X\} \cdot X_L \qquad (\text{П.1.25})$$

Решение:

$$R_{\Phi\text{-}E} = \frac{\mathrm{Re}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_X\} +}{\mathrm{Re}\{\underline{I}_R\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_X\} +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ \mathrm{Im}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_X\}}{+ \mathrm{Im}\{\underline{I}_R\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_X\}} \qquad (\text{П.1.26})$$

и

$$X_{\Phi\text{-}E} = \frac{\mathrm{Im}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_R\} -}{\mathrm{Re}\{\underline{I}_R\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_X\} +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{- \mathrm{Re}\{\underline{U}_{\Phi\text{-}E}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_R\}}{+ \mathrm{Im}\{\underline{I}_R\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_X\}} \qquad (\text{П.1.27})$$

Формулы для определения векторов тока и напряжения в этом случае приобретают следующий вид:

$$\underline{U}_{\Phi\text{-}E} = U_{\Phi\text{-}E} \cdot e^{j\varphi_U} = U_{\Phi\text{-}E} \cdot (\sin\varphi_U + \varphi\cos\varphi_U) \quad (\text{П.1.28})$$

$$\underline{I}_L = I_L \cdot e^{j\varphi_L} = I_L \cdot (\sin\varphi_L + j\cos\varphi_L) \quad (\text{П.1.29})$$

$$\underline{I}_E = I_E \cdot e^{j\varphi_E} = I_E \cdot (\sin\varphi_E + j\cos\varphi_E) \quad (\text{П.1.30})$$

Из формул (П.1.22), (П.1.23), (П.1.26) и (П.1.27), применяя некоторые тригонометрические преобразования, получаем следующее выражение для расчета искомого активного и реактивного сопротивления контура фаза-земля:

$$R_{\Phi\text{-}E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E}}{I_L} \times$$

$$\times \frac{\cos(\varphi_U - \varphi_L) -}{1 - \left(\frac{I_E}{I_L}\cdot k_{EX} + \frac{I_E}{I_L}\cdot k_{ER}\right)\cos(\varphi_E - \varphi_L) +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{-\frac{I_E}{I_L}\cdot k_{EX}\cdot \cos(\varphi_U - \varphi_E)}{+\frac{R_E}{R_L}\cdot\frac{X_E}{X_L}\cdot\left(\frac{I_E}{I_L}\right)^2} \quad (\text{П.1.31})$$

$$X_{\Phi\text{-}E} = \frac{U_{\Phi\text{-}E}}{I_L} \times.$$

$$\times \frac{\sin(\varphi_U - \varphi_L) -}{1 - \left(\frac{I_E}{I_L}\cdot k_{EX} + \frac{I_E}{I_L}\cdot k_{ER}\right)\cos(\varphi_E - \varphi_L) +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{-\frac{I_E}{I_L}\cdot k_{EX}\cdot \sin(\varphi_U - \varphi_E)}{+\frac{R_E}{R_L}\cdot\frac{X_E}{X_L}\cdot\left(\frac{I_E}{I_L}\right)^2} \quad (\text{П.1.32})$$

Компенсация влияния параллельной линии (учет взаимоиндукции)

Влияние этого эффекта на дистанционные измерения и основные принципы компенсации подробно описаны в п.3.5.3.

В этом случае в выражении (П1.23) необходимо дополнительно учесть составляющие тока нулевой последовательности $\underline{I}_{EP}$ параллельной цепи, обусловленного наличием взаимоиндукции, с соответствующими весовыми коэффициентами. Таким образом, с учетом компенсации влияния параллельной цепи токи $\underline{I}_R$ и $\underline{I}_X$ определяют следующим образом:

$$\underline{I}_R = \underline{I}_L - \frac{R_E}{R_L}\cdot\underline{I}_E - \frac{R_{0M}/3}{R_L}\cdot\underline{I}_{EP} =$$

$$= \underline{I}_L - k_{EP}\cdot\underline{I}_E - k_{EPR}\cdot\underline{I}_{EP} \quad (\text{П.1.33})$$

и

$$\underline{I}_X = \underline{I}_L - \frac{X_E}{X_L}\cdot\underline{I}_E - \frac{X_{0M}/3}{X_L}\cdot\underline{I}_{EP} =$$

$$= \underline{I}_L - k_{EX}\cdot\underline{I}_E - k_{EPX}\cdot\underline{I}_{EP} \quad (\text{П.1.34})$$

Используя снова формулы (П.1.26) и (П.1.27), можем вычислить полное сопротивление, однако теперь с учетом компенсации взаимоиндукции.

Векторы тока и напряжения в (П.1.28), (П.1.29) и (П.1.30) рассчитывают с учетом вектора тока нулевой последовательности $\underline{I}_{EP}$ параллельной линии:

$$\underline{I}_{EP} = I_{EP}\cdot e^{j\varphi_{EP}} =$$

$$= I_{EP}\cdot(\sin\varphi_{EP} + j\cos\varphi_{EP}) \quad (\text{П.1.35})$$

Таким образом, имеем в тригонометрической форме выражения (П.1.26) и (П.1.27) для расчета полного сопротивления с учетом компенсации взаимоиндукции:

$$R_{ф\text{-}E} = \frac{U_{ф\text{-}E}}{I_L} \cdot \frac{\cos(\varphi_U - \varphi_L) - k_{EX} \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_E) - k_{EPX} \cdot \frac{I_{EP}}{I_L} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_{EP})}{DN} \quad (П.1.36)$$

$$X_{ф\text{-}E} = \frac{U_{ф\text{-}E}}{I_L} \cdot \frac{\sin(\varphi_U - \varphi_L) - k_{ER} \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_E) - k_{EPR} \cdot \frac{I_{EP}}{I_L} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_{EP})}{DN}, \quad (П.1.37)$$

где знаменатель

$$DN = 1 - (k_{EX} + k_{ER}) \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_L) - (k_{EPX} + k_{EPR}) \cdot \frac{I_{EP}}{I_L} \cdot \cos(\varphi_{EP} - \varphi_L) + (k_{ER} \times k_{EPX} + k_{EX} \cdot k_{EPR}) \cdot \frac{I_E}{I_L} \cdot \frac{I_{EP}}{I_L} \cdot \cos(\varphi_E - \varphi_{EP}) + k_{ER} \cdot k_{EX} \cdot \left(\frac{I_E}{I_L}\right)^2 + k_{EPR} \cdot k_{EPX} \cdot \left(\frac{I_{EP}}{I_L}\right)^2$$

Контур фаза-фаза

Рассмотрим в качестве примера двухфазное КЗ $K^{(2)}_{BC}$ (L2-L3).

В этом случае уравнение для контура приобретает вид:

$$\underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} = \underline{I}_{L2} \cdot R_L + j\underline{I}_{L2} \cdot X_L - \underline{I}_{L3} \cdot R_L - j\underline{I}_{L3} \cdot X_L \quad (П.1.38)$$

$$R_{L2\text{-}L3} = \frac{U_{L2\text{-}L3} \cdot [I_{L2} \cdot \cos(\varphi_{UL2\text{-}L3} - \varphi_{IL2}) - I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{UL2\text{-}L3} - \varphi_{IL3})]}{I_{L2}^2 - 2 \cdot I_{L2} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{IL2} - \varphi_{IL3}) + I_{L3}^2} \quad (П.1.44)$$

$$X_{L2\text{-}L3} = \frac{U_{L2\text{-}L3} \cdot [I_{L2} \cdot \sin(\varphi_{UL2\text{-}L3} - \varphi_{IL2}) - I_{L3} \cdot \sin(\varphi_{UL2\text{-}L3} - \varphi_{IL3})]}{I_{L2}^2 - 2 \cdot I_{L2} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{IL2} - \varphi_{IL3}) + I_{L3}^2} \quad (П.1.45)$$

Вводим линейные величины

$\underline{U}_{L2\text{-}L3} = \underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3}$ и $\underline{I}_{L2\text{-}L3} = \underline{I}_{L2} - \underline{I}_{L3}$ (П.1.39)

В (П.1.31) выделяем вещественную и мнимую составляющие:

$$\mathrm{Re}\{\underline{U}_{L2\text{-}L3}\} = \mathrm{Re}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\}\underline{I}_{L2\text{-}L3}R_L - \mathrm{Im}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\} \cdot X_L \quad (П.1.40)$$

и

$$\mathrm{Im}\{\underline{U}_{L2\text{-}L3}\} = \mathrm{Im}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\} \cdot R_L + \mathrm{Re}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\} \cdot X_L \quad (П.1.\text{-}41)$$

Решение:

$$R_{L2\text{-}L3} = \frac{\mathrm{Re}\{\underline{U}_{L2\text{-}L3}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\} + \mathrm{Im}\{\underline{U}_{L2\text{-}L3}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\}}{[\mathrm{Re}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\}]^2 + [\mathrm{Im}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\}]^2} \quad (П.1.42)$$

и

$$X_{L2\text{-}L3} = \frac{\mathrm{Im}\{\underline{U}_{L2\text{-}L3}\} \cdot \mathrm{Re}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\} - (\mathrm{Re}\{\underline{U}_{L2\text{-}L3}\} \cdot \mathrm{Im}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\}}{[\mathrm{Re}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\}]^2 + [\mathrm{Im}\{\underline{I}_{L2\text{-}L3}\}]^2} \quad (П.1.43)$$

В результате введения векторных величин тока и напряжения получаем соответствующие формулы для расчета полного сопротивления при междуфазных КЗ:

Примечание: В рассмотренных выражениях (П.1.38)—(П.1.45) фаза L2 соответствует фазе B, а L3 – C.

П.1.3. Переходный режим

Формулы, приведенные выше, справедливы для установившегося режима.

Для того, чтобы оценить влияние переходного процесса необходимо смоделировать весь алгоритм цифровых вычислений и ввести в него оцифрованные измеренные значения. В устройствах Siemens используются программные средства имитации, которые позволяют составить точную и реалистичную модель поведения реле.

Переходный процесс (развитие короткого замыкания) должен быть представлен в виде файла с оцифрованными данными. Он может быть получен в результате имитации переходного процесса (EMTP, NETOMAC) или это может быть запись произошедшего события. Формат записи в любом случае должен быть COMTRADE[33]

П.1.4. Практическое применение

В реле Siemens серии 7SA используется шаг дискретизации $18^{0эл}$ для расчета полного сопротивления, что соответствует 20 дискретным величинам (выборкам) за период. Следовательно, частота дискретизации равна 1 кГц (1,2 кГц) при номинальной частоте сети 50 Гц (60 Гц). В действительности частота дискретизации может быть выше (выборка с запасом по частоте дискретизации), что позволяет осуществлять предварительную фильтрацию.

Метод быстрого преобразования Фурье (FFT — the fast Fourier transform), описанный выше, применим для обработки дискретных мгновенных значений, полученных при аналого-цифровом преобразовании. Полный цикл приведенного выше анализа Фурье справедлив для установившегося режима повреждения. При переходе от режима нагрузки к режиму короткого замыкания интервал наблюдения автоматически уменьшается и соответственно изменяются характеристики фильтра для уменьшения времени срабатывания. В случае синусоидальных сигналов нет снижения точности, поскольку для интегралов Фурье используют более короткие интервалы наблюдения, когда каждый раз вводится соответствующий поправочный коэффициент. Однако из-за помех эффективность фильтров снижается. Соответственно, зона защиты (область действия) уменьшается, когда после возникновения замыкания сокращаются интервалы наблюдения. Методы расчета полного сопротивления для интервалов наблюдения менее полупериода не рассмотрены в данной книге и здесь не приведены.

Метод расчета полного сопротивления, основанный на анализе Фурье, также используется для расчета расстояния до места КЗ (интегрированная функция определения места КЗ в реле 7SA). Однако в этом случае интервал наблюдения обычно больше одного периода и сопротивление при КЗ может быть определено более точно из ряда рассчитанных значений при помощи метода исправления ошибок (усреднения).

Формулы (П.1-26) и (П.1-27) или (П.1-30) и (П.1-31) позволяют выполнять расчеты не в темпе процессе (т.е. при повреждении), но и в любое время после его окончания на основе данных, полученных при регистрации повреждений или расчете КЗ. Векторные величины получают при помощи соответствующих компьютерных программ.

Например, в программе анализа повреждений SIGRA они также используют-

[33] Стандарт IEEE «Общий формат для обмена данными при переходных процессах в энергосистемах» («Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for power systems»)

ся. При этом интервал наблюдения при расчете полного сопротивления равен одному периоду и может быть перемещен курсором в любое место записанной при повреждении осциллограммы.

Программа позволяет представить на плоскости сопротивлений годограф измеренных полных сопротивлений, начиная от режима нагрузки, предшествовавшего возникновению КЗ и заканчивая моментом его отключения. Полные сопротивления контура в этом случае рассчитываются через интервалы времени, равные 1 мс, интервал наблюдения равен одному периоду. Это является весьма эффективным способом анализа повреждений и оценки действия дистанционной защиты.

Рекомендация

Традиционный метод расчета полного сопротивления основан на использовании следующей формулы для вычисления активного и реактивного сопротивления контура фаза-земля:

$$\underline{Z}_{ф\text{-}E} = \frac{\underline{U}_{ф\text{-}E}}{\underline{I}_{ф} - k_0 \cdot \underline{I}_E}$$

$$R_{ф\text{-}E} = \mathrm{Re}\{\underline{Z}_{ф\text{-}E}\}$$

и

$$X_{ф\text{-}E} = \mathrm{Im}\{\underline{Z}_{ф\text{-}E}\}$$

Использование этих формул дает те же результаты, что и описанный выше метод расчета с использованием формул (П.1-26) и (П.1.27) или (П.1.31 и П.1.32) для истинного контура замыкания (поврежденной линии) при металлическом КЗ ($R_{П} = 0$).

Учет сопротивления КЗ $R_{П}$ в обоих методах расчета различен и дает различные результаты, что подробно описано в п. 3.5.1. Эта разница незначительна для воздушных линий, когда фазовые углы полных сопротивлений прямой $\underline{Z}_L$ и нулевой $\underline{Z}_{L0}$ последовательностей не слишком отличаются. Однако в случае кабельных линий разница может быть существенной, поскольку фазовый угол сопротивления нулевой последовательности $\underline{Z}_{L0}$ может быть относительно небольшим по сравнению с фазовым углом сопротивления прямой последовательности $\underline{Z}_L$ (см. пример 5.1).

В некоторых реле на неповрежденных линиях при протекании по ним суммы тока КЗ и токов нагрузки и расчетном контуре, не соответствующем поврежденному, в зависимости от используемого метода расчета будут зарегистрированы большие расхождения.

При использовании обоих методов результаты расчета полного сопротивления контуров фаза-фаза одинаковы (см. п.п. 3.2.3).

П.1.5. Литература

[П.1.1] Herrmann H.–J.: Digitale Schutztechnik (Grundlagen, Software, Ausfuhrungsbeispiele); VDE- VERLAG, Berlin und Offenbach, 1997.

[П.1.2] IEEE Tutorial Course: Computer Reaying; Course Text 79 EH0148-7-PWR.

[П.1.3] Phadke, A.G. and Thorp, J.S.: Computer Relaying for Power Systems; John Wiley & Sons Inc. New-York – Chichester – Toronto – Brisbane – Singapore.

Research Studies Ltd. Taunton, Somerset, England.

[П.1.4] Johns, A.T. and Salman S.K.: Digital protection in Power Systems; IEE Power Series 15, 1995.

П.2. Расчет области действия резервных ступеней защиты на параллельных линиях

Рассмотрим конфигурацию системы, показанную на рис. П.2-1 и рассчитаем полные сопротивления для реле D1 при замыканиях на линии L3.

При расчете однофазных КЗ ограничимся рассмотрением контура замыкания и вычислением полных сопротивлений фаза-земля.

При расчете междуфазных КЗ полное сопротивление земли и полное сопротивление взаимоиндукции должны быть приняты равными нулю, также, как и коэффициенты компенсации в реле k_0 или k_{EX}. Затем расчет ведется для трехфазного КЗ.

Замечание

Что касается замыканий на землю, используемый метод расчета справедлив только для однородных сетей, где отношение Z_0/Z_1 одинаково во всех точках, т.е. для сетей, в которых фазный ток и ток в земле имеют одно и то же значение. Это справедливо в первую очередь для разветвленных сетей высокого напряжения.

В общем случае необходимо использовать метод симметричных составляющих. Однако решение при этом слишком объемно и поэтому здесь не приведено.

Данный метод учитывает влияние промежуточных источников питания и взаимоиндукции.

На практике используются различные компьютерные программы, с помощью которых проверяют зоны действия дистанционной защиты.

В простейшем случае используется компьютерная программа (программа расчета режима КЗ), в которой производится расчет векторов тока и напряжения в месте установки реле для выбранного места повреждения. Полные сопротивления реле затем могут быть определены из формул, приведенных в п. 3.2.3.

Метод расчета

Вначале упростим цепь, объединив источник А и включенную последовательно с ним двухцепную линию с промежуточным источником G в один источник (см. рис. П.2-2).

Эквивалентная ЭДС соответствует напряжению холостого хода в точке B при отключенных линиях L3 и L4:

$$\underline{E}_Q = \frac{\underline{E}_A \cdot (\underline{Z}_{SG} + \underline{Z}_{SGE}) + \underline{E}_G \cdot (\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_{SAE} + \underline{Z}_{PL12} + \underline{Z}_{PLE12})}{\Sigma \underline{Z}} \qquad (П.2.1)$$

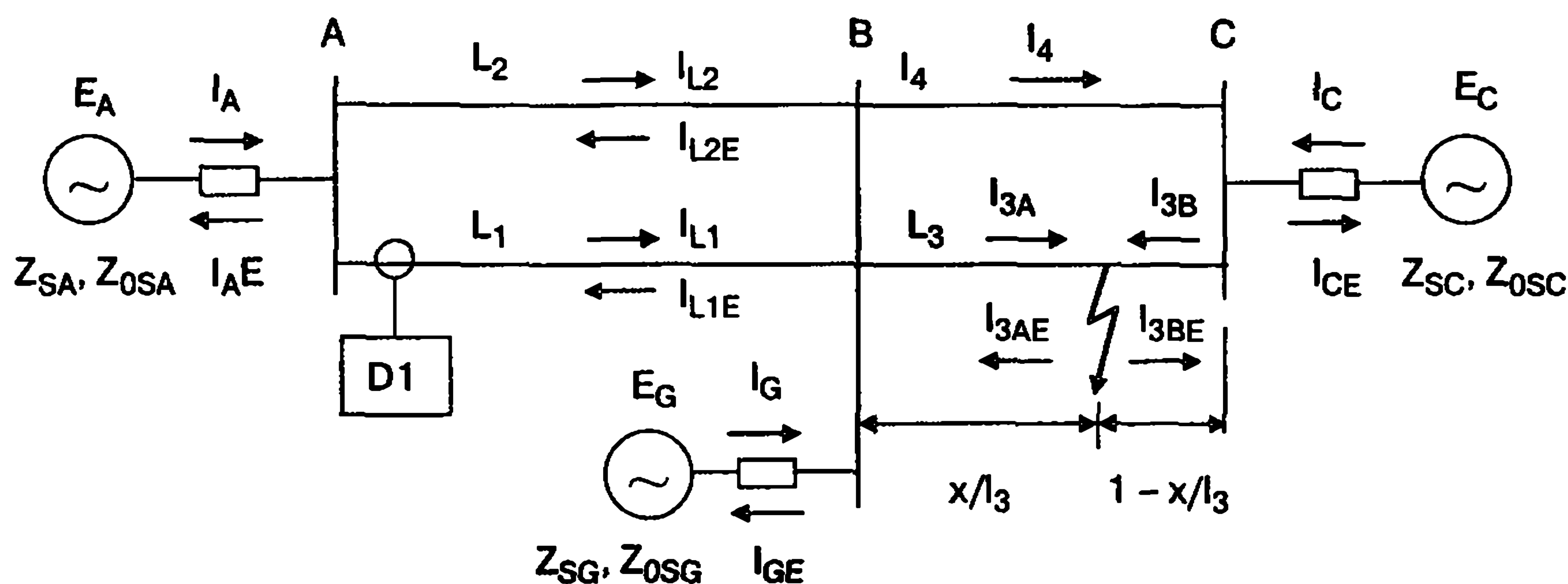


Рис. П.2.1. Область действия резервных ступеней защиты на параллельных линиях. Пример конфигурации системы (пример расчета)

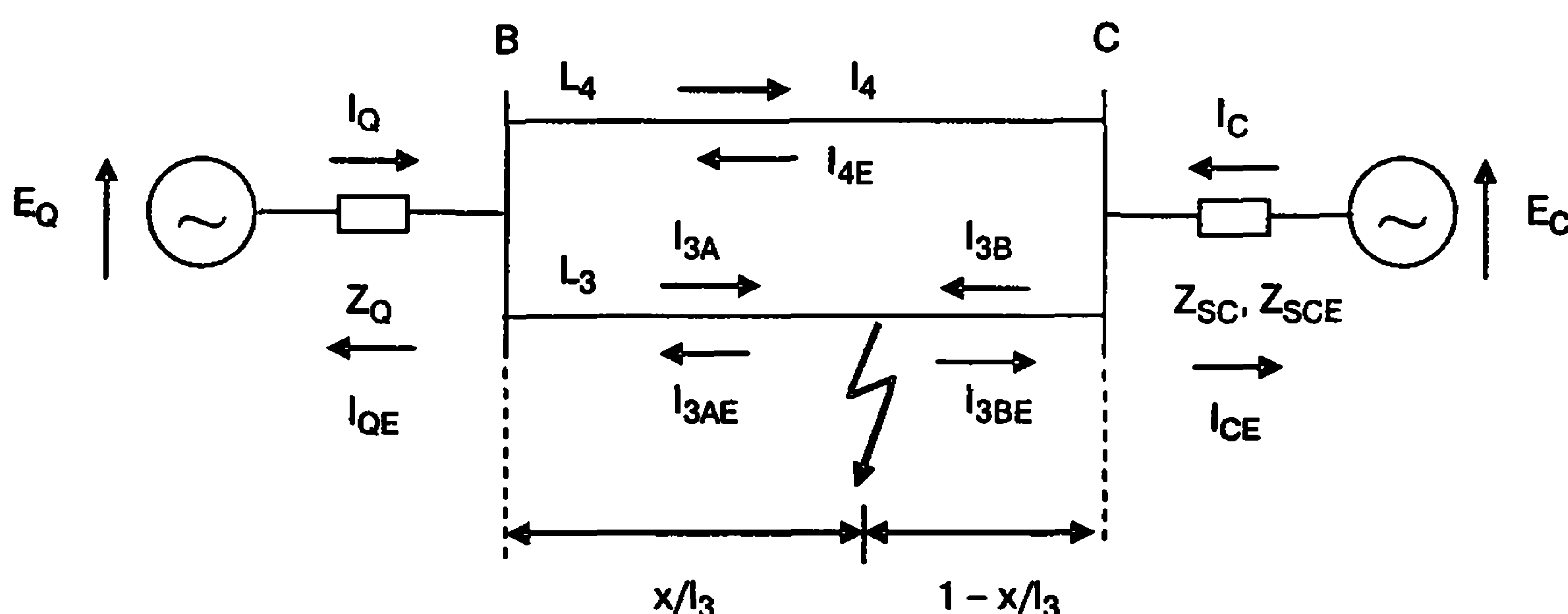


Рис. П.2.2. Упрощенная схема цепи рис. П.2-1

Полное сопротивление источника питания получаем при замыкании накоротко цепи в точке В; это означает, что ток от эквивалентной ЭДС должен быть равен сумме токов от двух независимых источников питания А и G:

$$\frac{\underline{E}_Q}{\underline{Z}_Q} = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_{SAE} + \underline{Z}_{PL12} + \underline{Z}_{PLE12}} + \frac{\underline{E}_G}{\underline{Z}_{SG} + \underline{Z}_{SGE}}$$

Подставляя E_Q из П.2.1, получаем:

$$\underline{Z}_Q = \frac{(\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_{SAE} + \underline{Z}_{PL12} + \underline{Z}_{PLE12}) \cdot (\underline{Z}_{SG} + \underline{Z}_{SGE})}{\Sigma\underline{Z}}, \qquad (П.2.2)$$

где $\Sigma\underline{Z} = \underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_{SAE} + \underline{Z}_{PL12} + \underline{Z}_{PLE12} + \underline{Z}_{SG} + \underline{Z}_{SGE}$ (П.2.3)

Полное сопротивление земли обычно получают из полных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей:

$$\underline{Z}_E = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{3} \qquad (П.2.3)$$

Полное сопротивление прямой последовательности параллельных линий:

$$\underline{Z}_{PL} = \frac{\underline{Z}_L}{2}, \qquad (П.2.4)$$

Полное сопротивление нулевой последовательности:

$$\underline{Z}_{0PL} = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0M}). \qquad (П.2.5)$$

Полное сопротивление земли для параллельных линий:

$$\underline{Z}_{PLE} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_L}{3} + \frac{\underline{Z}_{0M}}{3}\right) = \frac{\underline{Z}_L}{2} \cdot (\underline{k}_{EL} + \underline{k}_{EM}) \qquad (П.2.6)$$

Теперь можно составить три уравнения для контура:

$$\underline{E}_Q - \underline{E}_C = \underline{I}_Q \cdot \underline{Z}_Q + \underline{I}_4 \cdot (1 + \underline{k}_{EL4}) \cdot \underline{Z}_{L4} + \frac{x}{l_3} \cdot \underline{I}_{3A} \cdot \underline{k}_{EM34} \cdot \underline{Z}_{L3} - \left(1 - \frac{x}{l_3}\right) \cdot \underline{I}_{3B} \cdot \underline{k}_{EM34} \times \underline{Z}_{L3} - \underline{I}_C \cdot (\underline{Z}_{SC} + \underline{Z}_{SCE}) \qquad (П.2.7)$$

$$\underline{E}_Q = \underline{I}_Q \cdot \underline{Z}_Q + \underline{I}_{3A} \cdot \frac{x}{l_3} \cdot (1 + \underline{k}_{EL3}) \cdot \underline{Z}_{L3} + \underline{I}_4 \times \frac{x}{l_3} \cdot \underline{k}_{EM43} \cdot \underline{Z}_{L3} \qquad (П.2.8)$$

$$0 = \underline{I}_{3A} \cdot \frac{x}{l_3} \cdot \underline{Z}_{L3} \cdot (1 + \underline{k}_{EL3}) - \underline{I}_{3B} \cdot \left(1 - \frac{x}{l_3}\right) \times \underline{Z}_{L3} \cdot (1 + \underline{k}_{EL3}) + \underline{I}_4 \cdot \underline{Z}_{L3} \cdot \underline{k}_{EM43} - \underline{I}_4 \cdot \underline{Z}_{L4} \times$$

$\times (1 + \underline{k}_{EL4}) + \underline{I}_{3B} \cdot \left(1 - \frac{x}{l_3}\right) \cdot \underline{Z}_{L3} \cdot \underline{k}_{EM34} - \underline{I}_{3A} \times$

$\times \frac{x}{l_3} \cdot \underline{Z}_{L3} \cdot \underline{k}_{EM34}$ (П.2.9)

Учитывая уравнения для токов в узлах:

$\underline{I}_C = \underline{I}_{3B} - \underline{I}_4$ и $\underline{I}_Q = \underline{I}_{3A} + \underline{I}_4$,

а также симметрию параллельных линий ($Z_{L3} = Z_{L4}$, $k_{EL3} = k_{EL4}$ и $k_{EM34} = k_{EM43}$), получаем уравнения для нахождения неизвестных I_Q, I_4 и I_C:

$\underline{E}_Q - \underline{E}_C = \underline{I}_Q \cdot (\underline{Z}_Q + \frac{x}{l_3} \cdot \underline{k}_{EM34} \cdot \underline{Z}_{L3}) + \underline{I}_4 \cdot (1 +$

$+ \underline{k}_{EL3} + \underline{k}_{EM34}) \cdot \underline{Z}_{L3} - \underline{I}_C \cdot \left(\underline{Z}_{SC} + \underline{Z}_{SCE} - \left(1 -\right.\right.$

$\left.\left.- \frac{x}{l_3}\right) \cdot \underline{k}_{EM34} \cdot \underline{Z}_{L3}\right)$ (П.2.10)

$\underline{E}_Q = \underline{I}_Q \cdot \left(\underline{Z}_Q + \frac{x}{l_3} \cdot (1 + \underline{k}_{EL3}) \cdot \underline{Z}_{L3}\right) - \underline{I}_4 \cdot \frac{x}{l_3} \times$

$\times (1 + \underline{k}_{EL3} - \underline{k}_{EM34})$ (П.2.11)

$0 = \underline{I}_Q \cdot \frac{x}{l_3} - \underline{I}_C \cdot \left(1 - \frac{x}{l_3}\right) - \underline{I}_4 \cdot 2.$ (П.2.12)

Обозначим постоянные в уравнениях:

$\underline{a}1 = \underline{Z}_Q + \frac{x}{l_3} \cdot \underline{k}_{EM34} \cdot \underline{Z}_{L3}$,

$\underline{a}2 = \underline{Z}_Q + \frac{x}{l_3} \cdot (1 + \underline{k}_{EL3}) \cdot \underline{Z}_{L3}$,

$\underline{a}3 = \frac{x}{l_3}$,

$\underline{b}1 = (1 + \underline{k}_{EL3} - \underline{k}_{EM34}) \cdot \underline{Z}_{L3}$,

$\underline{b}2 = -\frac{x}{l_3} \cdot (1 + \underline{k}_{EL3} - \underline{k}_{EM34}) \cdot \underline{Z}_{L3}$,

$\underline{b}3 = -2$,

$\underline{c}1 = \left(1 - \frac{x}{l_3}\right) \cdot \underline{k}_{EM34} \cdot \underline{Z}_{L3} - (\underline{Z}_{SC} + \underline{Z}_{SCE})$,

$\underline{c}2 = 0$

и решим систему уравнений (П.2.10)—(П.2.12) относительно следующих токов:

$\underline{I}_Q = (\underline{d}1 \cdot \underline{b}2 \cdot \underline{c}3 + \underline{d}2 \cdot \underline{b}3 \cdot \underline{c}1 + \underline{d}3 \cdot \underline{b}1 \cdot \underline{c}2 -$
$- \underline{d}3 \cdot \underline{b}2 \cdot \underline{c}1 - \underline{d}1 \cdot \underline{b}3 \cdot \underline{c}2 - \underline{d}2 \cdot \underline{b}1 \cdot \underline{c}3)/\underline{N}$
(П.2.12)

$\underline{I}_4 = (\underline{a}1 \cdot \underline{d}2 \cdot \underline{c}3 + \underline{a}2 \cdot \underline{d}3 \cdot \underline{c}1 + \underline{a}3 \cdot \underline{d}1 \cdot \underline{c}2 -$
$- \underline{a}3 \cdot \underline{d}2 \cdot \underline{c}1 - \underline{a}1 \cdot \underline{d}3 \cdot \underline{c}2 - \underline{a}2 \cdot \underline{d}1 \cdot \underline{c}3)/\underline{N}$
(П.2.13)

$\underline{I}_C = (\underline{a}1 \cdot \underline{b}2 \cdot \underline{d}3 + \underline{a}2 \cdot \underline{b}3 \cdot \underline{d}1 + \underline{a}3 \cdot \underline{b}1 \cdot \underline{d}2 -$
$- \underline{a}3 \cdot \underline{b}2 \cdot \underline{d}1 - \underline{a}1 \cdot \underline{b}3 \cdot \underline{d}2 - \underline{a}2 \cdot \underline{b}1 \cdot \underline{d}3)/\underline{N}$,
(П.2.14),

где знаменатель

$\underline{N} = \underline{a}1 \cdot \underline{b}2 \cdot \underline{c}3 + \underline{a}2 \cdot \underline{b}3 \cdot \underline{c}1 + \underline{a}3 \cdot \underline{b}1 \cdot \underline{c}2 -$
$- \underline{a}3 \cdot \underline{b}2 \cdot \underline{c}1 - \underline{a}1 \cdot \underline{b}3 \cdot \underline{c}2 - \underline{a}2 \cdot \underline{b}1 \cdot \underline{c}3$,
(П.2.15)

Ток источника А:

$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A - \underline{E}_G + \underline{I}_Q \cdot (\underline{Z}_{SG} + \underline{Z}_{SGE})}{\Sigma \underline{Z}}$. (П.2.16)

Ток в месте установки реле на линии 1:

$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_A/2.$ (П.2.17)

Соответственно ток в земле $\underline{I}_{L1E} = -\underline{I}_{L1}$

Фазное напряжение в месте установки реле равно напряжению в точке А:

$\underline{U}_A = \underline{E}_A - \underline{I}_A \cdot (\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_{SAE})$ (П.2.18)

Следовательно, можно рассчитать полное сопротивление, измеряемое реле D1:

$\underline{Z}_{D1} = \frac{\underline{U}_{A(\phi\text{-}E)}}{\underline{I}_{L1} - \underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{L1E}} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{I}_{L1} \cdot (1 + \underline{k}_0)}$ (П.2.19)

Принимая в расчет четырехугольную характеристику, получаем реактивное сопротивление:

$X_{D1} = \frac{Im(\underline{U}_A / \underline{I}_{L1})}{(1 + k_{EX})}$ (П.2.20)

П.3. Расчет области действия резервных ступеней защиты на параллельных линиях: наклон верхней стороны четырехугольной характеристики для предотвращения излишних срабатываний защиты

Задача состоит в том, чтобы найти подходящую уставку по углу наклона верхней стороны характеристики первой ступени защиты питающего конца линии для предотвращения возможности ее срабатывания при максимальной нагрузке линии.

Вначале необходимо упростить схему цепи до конфигурации с «двумя источниками питания» (рис. П.3-1):

Необходимые данные о системе:

полные сопротивления линии прямой и нулевой последовательностей;

эквивалентные сопротивления источников питания прямой и нулевой последовательностей (Эти значения могут быть определены по мощности трехфазного и однофазного короткого замыкания питающих сетей, см. п. 3.2.1);

ЭДС $\underline{E}_A$ и $\underline{E}_B$.

Абсолютную величину вектора ЭДС можно принять равной $E = 1.1 \cdot U_{ном}/\sqrt{3}$ как при обычном расчете режима КЗ, а вектор $\underline{E}_A$ может быть принят за опорный ($\vartheta = 0$), при этом фазовый угол вектора $\underline{E}_B$ будет соответствовать углу передачи системы ϑ;

максимальная нагрузка линии в МВт.

По ней можем определить угол передачи ϑ, если он не известен.

На рис. П.3.1 в качестве примера приведены такие данные (технические параметры).

С достаточной степенью точности можем пренебречь емкостными сопротивлениями линий и вести расчет по сосредоточенным полным сопротивлениям. В результате получаем векторную диаграмму напряжений, представленную на рис. П.3.2.

Далее принимаем потери при передаче электроэнергии равными нулю и получаем хорошо известную формулу:

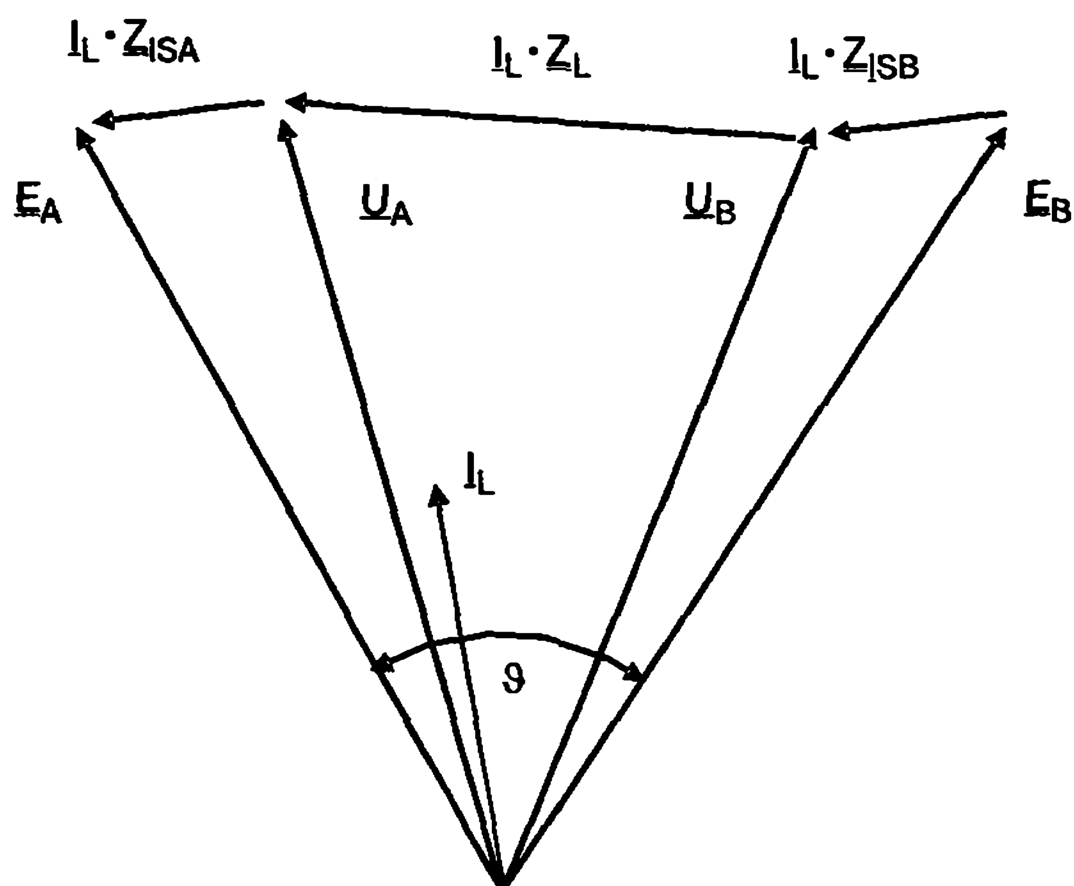


Рис. П.3-2. Векторная диаграмма напряжений для системы передачи электроэнергии

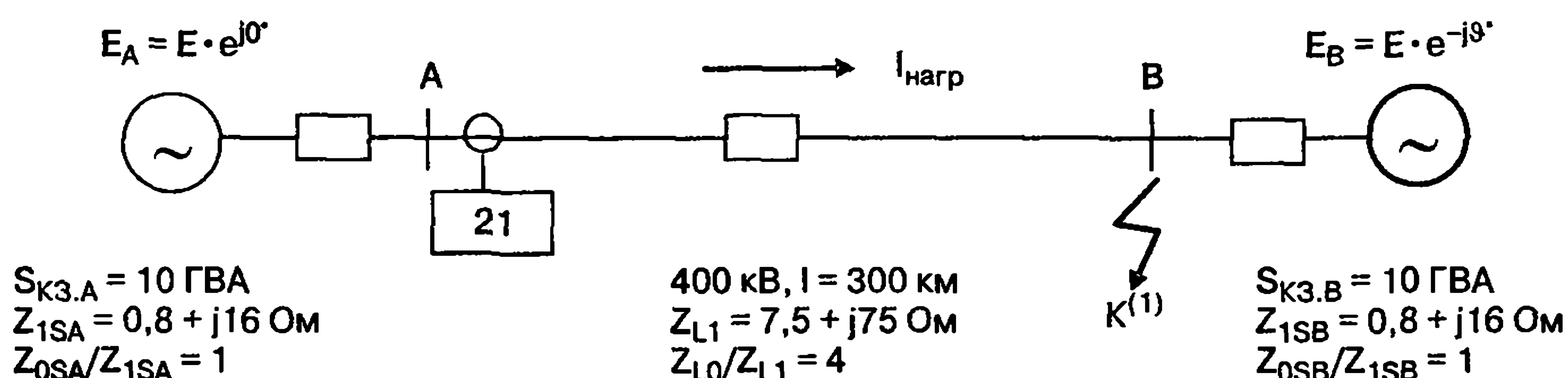


Рис. П.3-1. Линия передачи с двусторонним питанием

$$P = \frac{E_A \cdot E_B}{\Sigma X} \cdot \sin\vartheta \qquad (П.3.1)$$

После преобразований имеем:

$$\vartheta = \arcsin\left(\frac{P \cdot \Sigma X}{E_A \cdot E_B}\right) \qquad (П.3.2)$$

При Р = 900 МВт, ΣX = 107 Ом и E_A = = E_B = 400 • 1.1 кВ, получаем ϑ = 30°.

Напряжение в точке повреждения до его возникновения:

$$\underline{U}_{предш.К} = \underline{U}_B = \underline{E}_B + \underline{I}_{нагр,A} \cdot \underline{Z}_{SB} \qquad (П.3.4)$$

Ток повреждения $\underline{I}_К$ ($I_К = I_{1A} = I_{2A} = I_{0A}$ составляет 1/3 тока КЗ) определяем по напряжению в месте повреждения до его возникновения:

Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте установки защиты А:

$$\underline{I}_К = \frac{\underline{U}_{предш.К}}{2 \cdot \frac{(\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_L) \cdot \underline{Z}_{SB}}{\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{SB}} + \frac{(\underline{Z}_{0SA} + \underline{Z}_{0L}) \cdot \underline{Z}_{0SB}}{\underline{Z}_{0SA} + \underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0SB}} + 3 \cdot R_П} \qquad (П.3.5)$$

Следующий шаг состоит в вычислении токов и напряжений в точке А в месте установки реле при КЗ на удаленных шинах В.

Используем метод симметричных составляющих (рис. П.3.3) и принцип суперпозиции.

Ток нагрузки до возникновения повреждения:

$$\underline{I}_{нагр,A} = \frac{\underline{E}_A - \underline{E}_B}{\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{SB}} \qquad (П.3.3)$$

$$\underline{I}_{K1A} = \frac{\underline{Z}_{SB}}{\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{SB}} \cdot \underline{I}_К \qquad (П.3.6)$$

$$\underline{I}_{K2A} = \frac{\underline{Z}_{SB}}{\underline{Z}_{SA} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{SB}} \cdot \underline{I}_К \qquad (П.3.7)$$

$$\underline{I}_{K0A} = \frac{\underline{Z}_{0SB}}{\underline{Z}_{0SA} + \underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0SB}} \cdot \underline{I}_К \qquad (П.3.8)$$

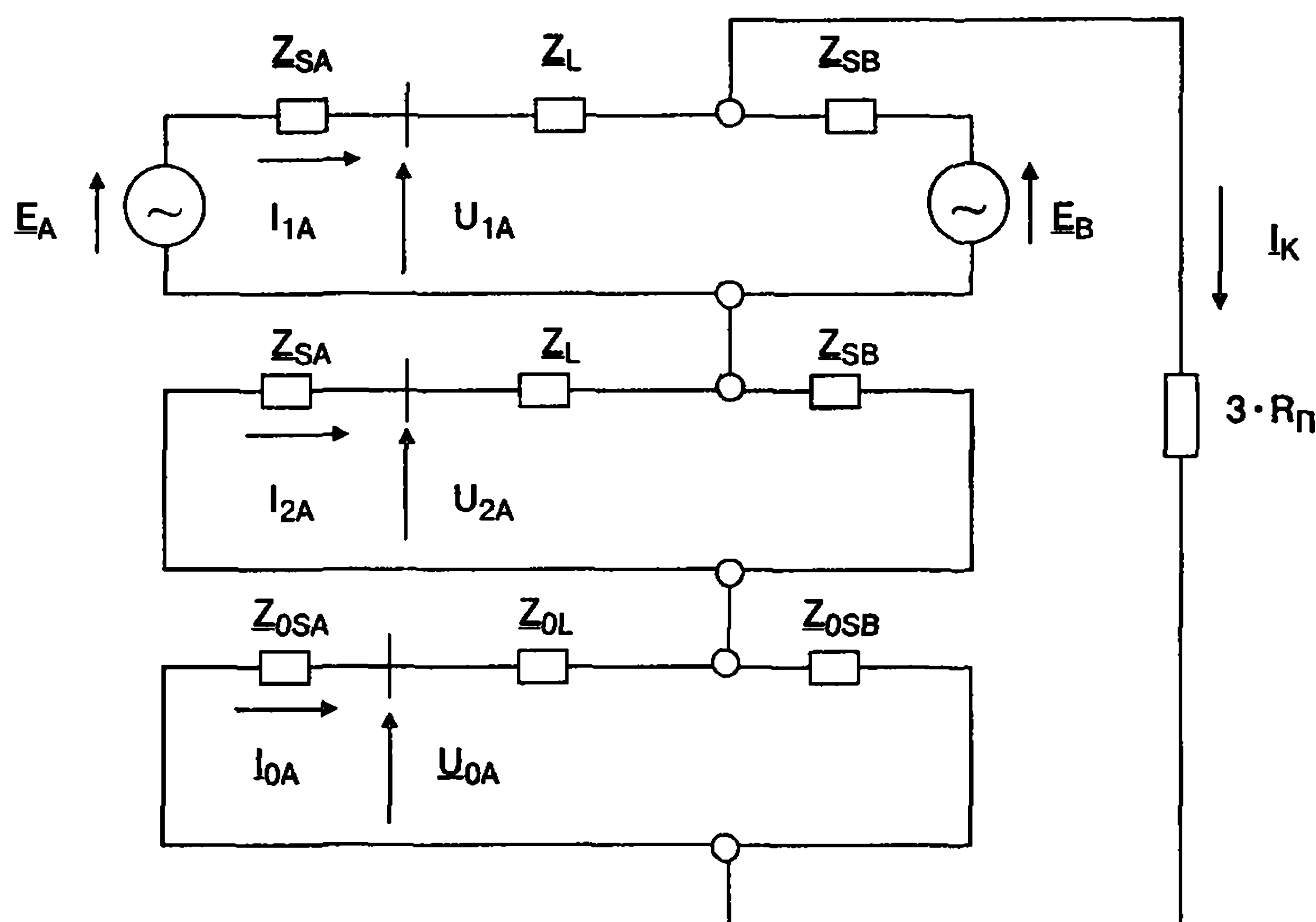


Рис. П.3-3. Эквивалентная схема для расчета однофазного КЗ на землю по методу симметричных составляющих (см. также рис. П.3-1)

Ток КЗ (аварийная составляющая) в месте установки защиты:

$$\underline{I}_{KAa} = \underline{I}_{K1A} + \underline{I}_{K2A} + \underline{I}_{K0A} \quad (П.3.9)$$

Суммарный (полный) фазный ток получаем, суммируя ток нагрузки до возникновения повреждения (КЗ) и ток КЗ:

$$\underline{I}_{Aa} = \underline{I}_{KAa} + \underline{I}_{нагр,A} \quad (П.3.10)$$

Ток в земле равен утроенному значению тока нулевой последовательности:

$$\underline{I}_{KA} = -3 \cdot \underline{I}_{K0A} \quad (П.3.11)$$

Напряжение прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке А:

$$\underline{U}_{1A} = \underline{E}_A - \underline{Z}_{SA} \cdot (\underline{I}_{K1A} + \underline{I}_{нагр,A}) \quad (П.3.12)$$

$$\underline{U}_{2A} = -\underline{Z}_{SA} \cdot \underline{I}_{K2A} \quad (П.3.13)$$

$$\underline{U}_{0A} = -\underline{Z}_{0SA} \cdot \underline{I}_{K0A} \quad (П.3.14)$$

Фазное напряжение (напряжение относительно земли) в месте установки защиты, А:

$$\underline{U}_{Aa} = \underline{U}_{1A} + \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A} \quad (П.3.15)$$

Теперь можно определить искомое полное сопротивление контура фаза-земля.

Коэффициент компенсации (поправочный коэффициент нулевой последовательности) рассчитывают по заданным значениям сопротивлений линии:

$$\underline{k}_0 = \frac{\underline{Z}_{0L} - \underline{Z}_L}{3 \cdot \underline{Z}_L} \quad (П.3.16)$$

$$\underline{Z}_{ф\text{-}E,a} = \frac{\underline{U}_{Aa}}{\underline{I}_{Aa} - (\underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{EA})} \quad (П.3.17)$$

$$X_{ф\text{-}E,a} = \mathrm{Im}\left(\frac{\underline{U}_{Aa}}{\underline{I}_{Aa} - (\underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{EA})}\right) \quad (П.3.18)$$

$$R_{ф\text{-}E,a} = \mathrm{Re}\left(\frac{\underline{U}_{Aa}}{\underline{I}_{Aa} - (\underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{EA})}\right) \quad (П.3.19)$$

Замечание:

Для упрощения расчета полного сопротивления здесь используются традиционные формулы.

Для расчета по методу, основанному на анализе Фурье (реле 7SA), можно использовать формулы, приведенные в Приложении П.1.

Для данного примера оба метода дают одинаковые результаты.

Отрицательный угол сдвига фаз измеряемого сопротивления КЗ рассчитывают по следующей формуле:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{X_{ф\text{-}E,a} - X_L}{R_{ф\text{-}E,a} - R_L}\right) \quad (П.3.20)$$

Фазовый угол зависит от величины сопротивления $R_П$ в месте КЗ.

На диаграмме, приведенной ниже, показаны рассчитанные значения угла α при различных значениях угла передачи ϑ.

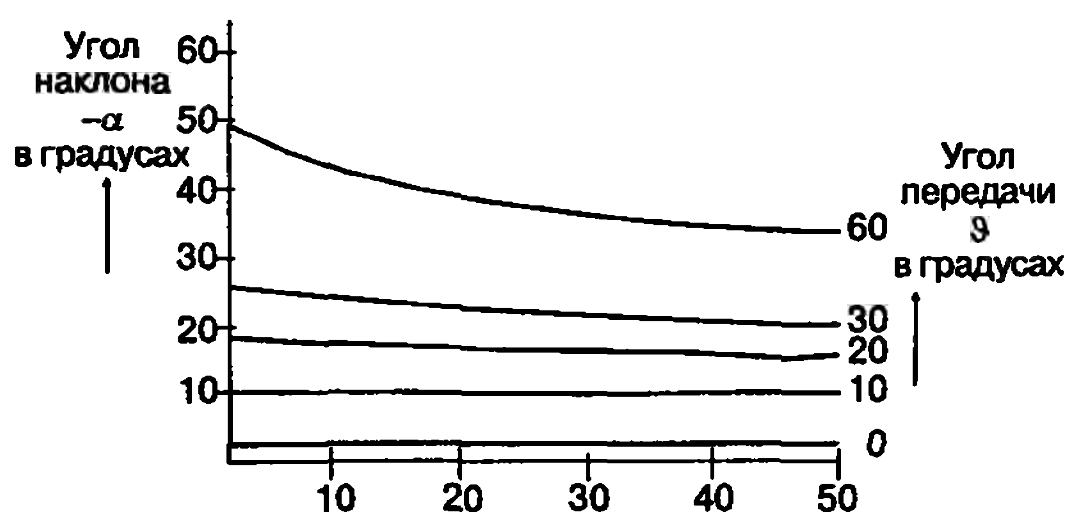


Рис. П.3-4. Угол наклона в зависимости от сопротивления КЗ в системе, изображенной на рис. П.3.1

Для определения угла наклона верхней стороны характеристики реле необходимо рассчитать угол сдвига фаз при максимальном значении сопротивления $R_П$ в месте КЗ, по крайней мере, при двух или трех промежуточных значениях. Затем можно выбрать наклон характеристики в соответствии с принятой уставкой первой ступени защиты (85%—90% Z_L), как показано в п. 6.3.1 (см. рис.6.7).

11. Список литературы

11.1. Научно-технические статьи

[1-1] Kumar, A.; Mainka, M.; Ziegler G.: 20 years of digital protection; Siemens EV-Report 4/94, September 1994, pp. 10-13

[1-2] IEEE Tutorial Course: Computer relaying; Course Text 79 EH0148-7-PWR, 1979

[1-3] Koch, G.; Westerholt, H.: Microprocessors enter the substation; Electrical Review 6/13, 1985

[1-4] Matla, W.; Ziegler, G.: Numerical EHV feeder protection, concept and realisation; CIGRE Conference, Paris 1994, Report 34—103

[1-5] Koch, G.; Renz, K.: Fully Microprocessor Based Feeder Protection, Siemens Power Energy & Automation, Vol. VII, (1985), pp. 174—177

[1-6] Mainka, M.; Koch, G.: Design aspects of a fully microprocessor-based feeder protection system for HV lines; CIGRE Conference, Paris 1986, Report 34—12

[1-7] Lemmer, S.; Meisberger, F.: Universeller Distanzschutz; etz, Bd. 113 (1992) H. 17, pp. 1076—1080 (in German); (Title: Universal distance protection)

[1-8] Claus, M.; Lemmer, S.; Ziegler, G.: Proceedings in distance relaying; IEE Conferrence on Developments in Power System Protection, Nottingham (UK), 1997, IEE Conference publication No. 434, pp. 28—31

[2-1] International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 448: «Power System Protection»

[3-1] Neugebauer, H.: Gleichstrom-Drehspulrelais mit Gleichrichter fur die Selektivschutztechnik; ETZ Jg. 71 1950, pp. 389—393. (in German) (Title: Rectifier bridge comparator for relaying)

[3-2] Warrington, A. R. van C.: Application of the OHM and MHO Principles to Protective Relays; Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Volume 65, 1996 (Paper 46—38)

[3-3] Wedepohl, L. M.: Polarized MHO Distance Relay; Proc. IEE, Vol. 112, No. 3, 1965, pp. 525—535

[3-4] Zurowski, E.: Elektronischer Distanzschutz mit polygonaler Auslwsecharakteristik Siemens Zeitschrift, Jg. 45, 1971, pp. 266—268 (in German);

(Title: Static distance relay with quadrilateral characteristic)

[3-5] CIGRE Working Group Report: Protection Systems Using Telecommunication; Technical Brochure 13, 1987, CIGRE Central Office, Paris

[3-6] CIGRE Working Group Report: Protection using telecommunication; Technical Brochure No. 192, CIGRE Central Office, 2001

[3-7] Clarke, E.: Impedances seen by relays during power swings with and without faults; AIEE Transactions 1945, Volume 64, pp. 373—384

[3-8] AIEE/PES T&D Committee Working Group Report: Arc deionization times on high speed three pole reclosing; IEEE Transactions on PAS, Vol. 82, 1963, pp. 236—253

[3-9] Haubrich, H.: Einpolige Kurzunterbrechung in Hochstspannungsnetzen ьber 500 kV; ETZ-A, Bd. 91 (1970), H.8, pp. 453—458 (in German);

(Title: Single-pole ARC in EHV systems above 500 kV)

[3-10] IEEE Committee Report: Single Phase Tripping and Reclosing of Transmission Lines; IEEE Paper, 91 SM 360-8 PWRD, 1991

[3-11] Krieser, F.: Ein Messgerat zur Anzeige der Fehlerentfernung wahrend des Kurzschlusses; Siemens Zeitschrift Jg. 33, 1959, pp. 232—235 (in German);

(Title: A measuring instrument for the indication of the fault location during the short-circuit)

[3-12] Buurman, E. und Schaale, J.: Fehlerorter 7SE1 mit Arithmetikprozessor, Siemens Energietechnik 4/1980; pp. 118—120 (in German)

(Title: Fault locator 7SE1 with a numeric processor)

[3-13] Ziegler, G.: Fault location in H.V. power systems; IFAC Symposium on Automatic Control in Power Generation, Distribution and Protection; Pretoria, 1980, pp. 121—129

[3-14] Hagenmeyer, E. und Zurowski, E.: Decentralized fault location combined with centralized computer evaluation in a main control centre gives optimized network operation; CIGRE Conference, Paris 1982, Report 34-09

[3-15] Cook, V.: Fundamental aspects of fault location algorithms used in distance protection; IEE Proc., Vol. 133, Pt. C, No.6, Sept. 1986

[3-16] Eriksson, L., Saha, M. M, Rockefeller, G. D.: An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed; IEEE Trans. On Pow. App. and Syst. Vol. PAS-104. No. 2, February 1985

[3-17] Sachdev, M. S., Agarwal, R.: A technique for estimating transmission line fault locations from impedance relay measurements; IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, January 1988

[3-18] G Kiessling & S Schwabe: Software solution for fault record analysis in power transmission and distribution; IEE-DPSP Conference, Amsterdam, 2004, Session 6, paper 48

[3-19] Philippot, L.: Parameter estimation and error estimation for line fault location and distance protection in power transmission systems; Ph. D. Thesis, Universitй Libre de Bruxelles, February 1996

[3-20] IEEE Tutorial Course on "Advancements in microprocessor based protection and communication"; 1997, IEEE Catalogue Number: 97TP120-0,

[3-21] Ulbrich, R. und Kadner, G.: Richtlinien fur das Aufstellen von Staffelpllnen; Mitteilungen des Instituts fur Energetik, 1957, H. 7, pp. 24—68 (in German);

(Title: Recommendations for the design of grading charts)

[3-22] VDEW-Ringbuch Schutztechnik; Teil 9: Empfehlungen zur Endzeitstaffelung); VWEW-Verlag Frankfurt/M., 1988 (in German);

[3-23] P.J. Moore, R.K Aggarwal, H. Jiang and A.T. Johns: New approach to distance protection for resistive double-phase to earth faults using adaptive techniques; IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 141, No. 4, July 1994

(Recommendations of the German Utility Board for the grading of final back-up zones)

[3-24] Lemmer, S., Linker, K.-W., Stцber, K.-J.: Leistungsfahige Software unterstutzt die Koordination des Distanzschutzes in Mittelspannungsnetzen; Siemens EV-Report 1/93, pp. 24—26 (in German);

(Title: Powerful program assists distance relay co-ordination

[3-25] IEC/TR2 60909-1: Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems, Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three phase systems according to IEC 909 (Technical report)

[3-26] Lienart, P., et al.: La Protection des Rйseaux MT par un Relais Numйrique a Base d'Algorithme de Distance. Rйsultats d'Essais en Laboratoire et de Mise en Exploitation sur un Rйseau MT en Belgique; CIRED 1989, Conference manual pp. 144—150

[3-27] Marttila, R.J.: Directional characteristics of distance relay mho elements

(Part I: A new method of analysis; Part II: Results); IEEE Transactions on Pow. App. and Syst., Vol. PAS-100, No. 1, 1981, pp. 96—113

[3-28] Walter, M.: Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip; Verlag Von Oldenbourg, Munchen Berlin, 1933 (in German)

(Title: Protection according to the impedance principle)

[3-29] Warrington, A.R. van C.: Protective Relays, Their Theory and Practice;

Volume1; Chapman and Hall, London, 1962

[3-30] Sebo, S.A.: Zero-sequence current distribution along transmission lines; IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-88, No. 6, June 1969, pp. 910—919

[3-31] Gammelsaeter, H. und Nordboe, A.: Shield wire conductivity cuts fault effects; Electrical World, April 24, 1961, pp. 50-51

[3-32] Blackburn, J. L.: Symmetrical Components for Power Systems Engineering; Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1993

[3-33] Roeper, R.: Short-circuit currents in three-phase systems; Siemens AG, 1985

[3-34] Kadner, G. und Wacarda, G.: Verhalten von Distanzrelais in starr geerdeten Hochspannungsnetzen; Mitteilungen des Instituts fur Energetik, Heft 17, 1959, pp. 361—378 (in German); (Title: Behaviour of distance relays in effectively earthed power systems)

[3-35] 34Wheeler, S.: Influence of mutual coupling between parallel circuits on the setting of distance protection; PROC. IEE, Vol. 117, No. 2, 1970, pp.439—445

[3-36] Simon, R.: Netzbedingte Unschlrfen des Distanzschutzes; Dissertation D386 der Universitдt Kaiserslautern (in German);

(Title of the thesis: Power system conditioned inaccuracies of distance protection)

[3-37] Adamson, C., Tureli, A.: Errors of sound-phase-compensation and residual-

compensation systems in earth-fault distance relaying; PROC. IEE, Vol, 112, No. 7, 1965

[3-38] Davison, E. B. and Wright, A.: Some factors affecting the accuracy of distance-type protective equipment under earth-fault conditions; Proc. IEE, Vol. 110, No. 9, 1963, pp. 1678—1688

[3-39] Phadke, A.G. und LU Jiuang: A computer based integrated distance relay for parallel transmission lines; IEEE Transactions on Pow. App. and Syst., Vol 104, No. 1, 1985. pp. 445—452

[3-40] Gilany, M.I., Malik O.P., Hope, G.S.: A digital technique for parallel transmission lines using a single relay at each end; Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, 1992, pp. 118—125

[3-41] Requa, R.: Die Grenzen der Anwendbarkeit des Distanzschutzprinzips; ETG Fachbericht 12: Selektivschutz, pp. 22—28; VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1983 (in German);

(Title: The application limits of distance protection)

[3-42] CIGRE Technical Brochure No. 64: Application Guide on Protection of Complex Transmission Network Configurations; CIGRE Office, Paris, 1992

[3-43] Newbould, A.: Series compensated lines issues relevant to the application of distance protection; Canadian Electrical Association (CEA) Spring Meeting 1987
Relay Catalogue SIPROTEC (Digital Protection), Siemens PTD PA, 2003, www.siprotec.com

[3-44] Elmore W., Anderson F.: Overview of Series-Compensated Line Protection Philosophies; 20th Annual Western Protective Relay Conference, Spocane, Washington, USA, Oct. 1990

[4.1] System description SIPROTEC 4, Siemens PTD PA, 2003

[4.2] www.siprotec.com

[4.3] Centralized and remote communication with Siemens protection relays (overview); Siemens AG, Protection Systems Catalog LSA 2.8.1, 1997

[4.4] Buchholz, B. M., Kolberg, B. und Schuster, N.: Protection and substation control speak the same language; Siemens EV-Report, Jg. 5, H. 2/94

[5.1] VDEW-Ringbuch Schutztechnik, Teil 2: Richtlinien fur statische Schutzeinrichtungen, VWEW-Verlag, Frankfurt/M., 1987 (in German);

(Title: Recommendations of the German Utility Board for static protection systems)

[5.2] Davey, J.: Independent pole tripping: Key to system stability; Electrical Light and Power, T/D Edition, November 1979, pp. 81—83

[5.3] Freygang, H.-J.: Messwandler fur den Selektivschutz; ETG Fachberichte 12: Selektivschutz, 1983, pp. 156—171 (in German)

(Title: Instrument transformers for protection)

[5.4] IEC 60044-1: Instrument transformers — Part 1: Current transformers; First edition 1996-12

[5.5] IEEE /ANSI C.57.13 (1986): Standard Requirements for Instrument Transformers

[5.6] IEEE Std C37.110-1996: IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes.

[5-7] Bruce, R.G. and Wright, A.: Remanent flux in current transformer cores; Proc. IEE, Vol. 113, No. 5, May 1966, S. 915—920

[5-8] Iwanusiw, O.W.: Remanent flux in Current Transformers; Ontario Hydro Research Quarterly, 3rd quarter, 1970, pp. 18 to 21

[5.9] Zahorka, R.: Das Verhalten von Stromwandlern bei Einschwingvorgangen mit Gleichstromgliedern unter Berucksichtigung der Sattigung; AEG-Mitteilungen 57 (1967), pp. 19—27 (in German)

(Title: Transient CT performance considering asymmetrical currents and saturation)

[5.10] Fischer, A. und Rosenberger, G.: Behaviour of current transformers with linear characteristics and closed magnetic circuits when subjected to asymmetrical short-circuit currents; Reprint from Elektrizititswirtschaft (1968), Volume 12, pp. 310-315

[5.11] IEC-60044-6: Instrument transformers — Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance; First edition 1992-03

[5.12] Hodgkiss, J.W.: The behaviour of current transformers subjected to transient asymmetrical currents and the effects on associated protective relays; CIGRE Report No. 329, 1960

[5.13] IEEE Committee Report: Transient Response of Current Transformers; IEEE Paper 76 CH 1130-4-PWR, 1976

[5-14] G. Duboc et al: Old-time saturating current transformers and new digital distance protections. CIGRE SC34 Colloquium, Sibiu, Romania, 10—14 Sept. 2001, Report 302

[5.15] Gertsch, G.A., Antolic, F. und Gygax, F.: Capacitor voltage transformers and protective relays; CIGRE Conference, Paris 1968, Report 31-14

[5.16] Born, E.: Schneller Selektivschutz mit kapazitiven Spannungswandlern; ETZ-A, Bd. 86 (1965), pp 557—560 (in German);
(Title: Fast system protection with CVTs)

[5.17] Kezunovic, M., Frommen, C.W. and Nilsson, S.L.: Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies; IEEE Power System relaying Committee, Paper 92 WM 204-8 PWRD, 1992

[5.18] Wiszniewski, A. and Izykowski, J.: Influence of ferroresonance suppression circuits upon the transient response of capacitive voltage transformers; IEE Conference, Publication No. 125, pp. 182—188

[5.19] IEEE Relay Committee Report: Transient response of coupling capacitor voltage transformers; IEEE Transactions on Pow. App. and Syst., Vol. PAS-100, No. 12, 1981, pp. 4811—4814

[5.20] Holbach, J. und Claus, M.: Zuverlassiger Distanzschutz auch bei gesturten Messignalen; Elektrizitatswirtschaft, Jg. 97 (1998), pp. 57—61 (in German);
(Title: Reliable distance protection also with disturbed measuring signals)

[5.21] Steynberg, G. and Kereit, M.: Analysis of numerical distance performance under extreme conditions; South African Conference on Power System Protection 2000

[5.22] Salle, P.: Influence des rйgimee transitoires des TCT sur le fonctionnement des protections de distance; RGE (Revue Gйnйral d'Electricitйe), No. 4, April 1990, pp. 14—17

[5.23] Kasztenny, B. et al: Distance relays and capacitice voltage transformers – Balacing speed and transient overreach, 55th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, May, 2001

[5.24] Ziegler, G.: Digitaler Schutz fur Mittelspannungsnetze; Elektrizitatswirtschaft 95 (1996); pp. 120—124 (in German);
(Title: Numerical protection of medium voltage systems)

[5.25] Ziegler, G.: Protection of distributed generation, current practice; CIGRE Symposium in Neptun, Rumania, Septemer 1997; Report No.

[5.26] AIEE Committee Report: Protection of multiterminal and tapped lines; AIEE Transactions, Pt. III (Pow. App. and Syst.) Vol. 80, 1961, pp. 55—66

[5.27] IEEE Relay Committee: Protection Aspects of Multi-Terminal Lines; IEEE Paper 79 TH0056-2-PWR, 1979

[5.28] VDEW-Ringbuch Schutztechnik, Teil 11: Anregeprobleme beim Reserveschutz, VWEW-Verlag, Frankfurt/M:, 1998 (in German);
(Title: Fault detection problems with back-up protection

[5.29] Willheim, G. and Waters, M.: Neutral Grounding in High Voltage Transmission; Elsevier Publishing Company, New York, 1956

[5.30] Ziegler, G.: Digitaler Schutz fur Industrieanlagen; etz 1997, H. 18, pp. 30—35 (in German);
(Numerical protection of industrial plants)

[5.31] Hadick, W.; Scharf, T.: A new static back-up protection for ehv systems using zero sequence quantities; IEE Conference on Developments in Power-System Protection, London 1980, Conference manual pp. 226 - 230

[5.32] Humpage, W. D. and Lewis, D. W.: Distance protection of teed circuits;
PROC. IEE, Vol. 114, No. 10, 1967, pp. 1483—1498

[5.33] Corroyer, C. and Chorel, H.: Protection of multi-terminal EHV-links; CIGRE Conference, Paris 1982, Report 34-01

[5.34] CIGRE Technical Brochure No. 64: Application Guide on Protection of Complex Transmission Network Configurations; CIGRE Office, Paris, 1992

[6.1] Centralized and remote communication with Siemens protection relays (overview); Siemens AG, Protection Systems Catalog LSA 2.8.1, 1997

[6.2] DIGSI Relay operating program 7XS5; Siemens AG, Protection Systems Catalog LSA 2.8.2

[6.3] **N**orth **A**merican **E**lectric **R**eliability **C**ouncil: August 14, 203 Blackout: "NERC Actions to Prevent und Mitigate the Impacts of Future Cascading Blackouts", February 10, 2004 (www.nerc.com)

[8.1] Portable test set 7VP15 (Omicron CMC156); Siemens AG, Protection Systems Catalog LSA 2.6.1

[8.2] Omicron electronics GmbH: Literature: End-to-End test (www.omicron.at)

[9.1] Prufempfehlungen fur digitale Schutzeinrichtungen mit Selbstuberwachung.

Herausgegeben vom VDEW-Arbeitsausschuss "Relais- und Schutztechnik", April 1995

(Test recommendations for numerical protection equipment, published by the German Utility Board)

11.2. Книги

[1] Herrmann, H.-J.: Digitale Schutztechnik; VDE-VERLAG, Berlin und Offenbach, 1997 (in German)

(Book on numerical protection: Fundamental principles, software, implementation examples.)

[2] Johns, A.T. and Salman, S.K.: Digital Protection for Power Systems; IEE Power Series 15, Peter Peregrims Ltd., 1995

[3] Phadke, A.G. and Thorp, J.S.: Computer Relaying for Power Systems; Research Studies Press Ltd., London, 1995

[4] Wright, A. and Christopoulos, C.: Electrical Power System Protection; Chapman & Hall, London, 1993

[5] VWEW-Verlag: VDEW-Ringbuch Schutztechnik, 1988; (in German)

Recommendations of the German Utility Board on system protection.

[6] Clemens, H. und Rothe, K.: Schutz in Elektroenergiesystemen; Verlag Technik GmbH Berlin, 1991 (in German)

(Book on protection of power systems)

[7] Cook, V.: Analysis of Distance Protection; Research Studies Press Ltd. Letchworth, Herfordshire, England, 1985

[8] Blackburn, J. L.: Protective Relaying: Principles and Applications,

Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1987

[9] Blackburn, J. L.: Symmetrical Components for Power Systems Engineering;

Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1993

Out of print books (history and fundamental principles):

[10] Roeper, R.: Short-circuit currents in three-phase systems; Siemens AG, 1985

[11] Walter, M.: Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip, Verlag Von Oldenbourg, 1933 (in German)

(Book on distance relaying)

[12] Neugebauer, H.: Selektivschutz; Springerverlag Berlin/Gцttingen/Heidelberg, 1958 (in German)

(Book on protective relaying)

[13] Erich, M.: Relaisbuch (VDEW); Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1959 (in German);

Book on protective relaying, issued by the German utility board

[14] Warrington, A.R.C.: Protective Relays. Their Theory and Practice

Verlag Chapman and Hall, Band 1, London, 1962

[15] Mason C.R.: The Art & Science of Protective Relaying, Verlag John Wiley & Sons, Inc. New York, London, Sydney, 1956 (sixth re-edition 1967)

[16] Clarke, E.: Circuit Analysis of A-C Power Systems, Vols. I and II, General Electric Co., Schenectady, N.Y., 1943 und 1950

Дополнительная литература

Д.1. А.М. Федосеев. Релейная защита электроэнергетических систем: Учебное пособие для вузов. Репр. воспр. Изд. 1984 г. — М.: Издательство МЭИ, 2004 — 520 с.

Д.2. Г.И. Атабеков. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М.-Л., ГЭИ, 1957, 344.

Д.3. Э.М. Шнеерсон. Динамика сложных измерительных органов релейной защиты. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 208с.

Д.4. Э.М. Шнеерсон. Дистанционные защиты. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 448 с.

Д.5. Е.А. Аржанников. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыкании на землю. М.: Энергоатомиздат, 1985 - 176 с.

Д.6. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. /под. Редакцией А.Ф. Дьякова. — М.; Энергоатомиздат, 2003. — 768 с.

Д.7. Релейная защита и автоматика Энергосистем 2004, Выставка и конференция 18—21 мая 2004 г. Сб. докладов. М., ВВЦ, 2004 г.

Производственно-практическое издание

Циглер Герхард

Цифровая дистанционная защита.
Принципы и применение

Редактор издательства *Желдыбин А. Б.*
Верстка ООО «ЭЛЕКТРОНИНФОРМ»

Подписано в печать с оригинал-макета
30.09.05. Формат 70 × 100 1/16. Бумага офсетная № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 27,40. Уч.-изд. л. 32,0.
Тираж 1000 экз. Заказ 412т

Энергоиздат. 123154, Москва Д-154,
Бульвар генерала Карбышева, 12-48.

Отпечатано в типографии ФГУП «НИИ «Геодезия»
Моск. обл. г. Красноармейск, пр-т Испытателей, д.14.